

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Парненко Валерія Сергіївна

УДК
621.914.5

ДИСЕРТАЦІЯ

ДИСКОВІ ОБКАТНІ ФРЕЗИ ДЛЯ ОБРОБКИ ВІДРІЗНИХ ПИЛ З НЕРІВНОМІРНИМ КРОКОМ

05.03.01 - Процеси механічної обробки, верстати та інструменти

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____ Парненко В.С.

Науковий керівник: **Равська Наталія Сергіївна** професор, заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук

Київ-2019

АНОТАЦІЯ

Парненко В.С. Дискові обкатні фрези для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти. - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2019.

Дисертація присвячена питанням розробки дискових обкатних фрез для виготовлення відрізних пил з нерівномірним кроком заданого профілю стружкових канавок та з забезпеченням точності за кроком.

В роботі наведений аналіз різних форм зубів відрізних пил, конструктивні параметри та їх розташування на робочій частині, які виготовляються, відповідно до стандартів та пропонуються фірмами виробниками, зокрема і пили з нерівномірним кроком. Розглянуто область застосування кожного типу пил, переваги та недоліки. Проаналізовані сучасні способи обробки багатозубих виробів, до яких також належать відрізні пили. Ці способи базуються на методах обробки копіюванням, обкочуванням та дотику (обхід по контуру на верстатах з ЧПК).

Обґрунтовано вибір способу обробки зубів пил з нерівномірним кроком дисковими обкатними фрезами, який не потребує додаткових витрат на придбання спеціалізованого обладнання з програмним керуванням при нарізанні зубів пил цієї конструкції.

На основі загальних положень теорії формоутворення поверхонь обкатними фрезами розроблена теорія їх проектування для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком у групі. Теорія проектування обкатних фрез розглянута на прикладі обробки пил з дрібним зубом.

Теорія проектування дискових обкатних фрез для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком включає визначення базових точок різальних кромок фрези та допустимого їх зовнішнього радіуса в залежності від

конструктивних параметрів нарізаної пили. Для визначення радіусів перехідних кривих в западинах стружкових канавок пил теорія проектування передбачає визначення параметрів установки фрези відносно осі пили.

На базі розробленої теорії проектування дискових обкатних фрез для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком розглядається задача розробки конструкції обкатної фрези.

При розробці конструкції обкатної фрези першочерговою задачею є визначення її зовнішнього діаметра з урахуванням переточок. Зовнішній діаметр обкатної фрези з врахуванням переточок визначається мінімальним розрахунковим діаметром – D_{min} . Для цього були розраховані мінімальні кроки зубів з різною кількістю їх в групі та дані рекомендації по вибору мінімально допустимого кроку і визначення по ньому параметра розподілення нерівномірності Δ та числа зубів у групі Z_{gr} , а також діаметра D і загального числа зубів Z відрізної пили (кратних числу зубів в групі).

В роботі показано, який вплив на розміри перехідних кривих мають конструктивні параметри пили. Показано, що установка осі обкатної фрези до осі пили є прийнятною не для всіх типорозмірів відрізних пил.

Розробка конструкції дискових обкатних фрез включає також визначення координат базових точок різальних кромок фрези, визначення радіуса кожного її зуба та їх зміщення відносно один до одного.

Координати базових точок A , B і C різальних кромок фрези залежать від її установки відносно осі пили та визначаються на основі розрахунку відповідних точок профіля стружкових канавок пили.

Розглянуто геометричні параметри різальної частини в процесі роботи обкатної фрези. Показано, що ці параметри треба розглядати в кінематичній системі координат. Виведені залежності для розрахунку зміни геометричних параметрів різальної частини обкатної фрези в процесі роботи та досліджено зміну цих параметрів. Встановлено, що кінематичні кути вздовж різальної кромки залежать від числа зубів нарізаної пили,

переднього кута, числа зубів в групі та діаметра обкатної фрези. Встановлено, що зміна передніх γ та задніх α кутів вздовж різальних кромок фрези носить прямо протилежних характер. При обробці різальною кромкою передньої поверхні пили кут γ збільшується і зменшується при обробці потиличної і навпаки – кут α зменшується при обробці передньої поверхні, досягаючи від'ємних значень та збільшується при обробці потиличної. Для забезпечення сприятливої геометрії вздовж різальних кромок в процесі роботи фрези з $Z_0=4$ рекомендовано їх заточувати з різними кутами: $\alpha_{Nnp} = 15^\circ$ та $\alpha_{Nлв} = 5^\circ$.

Викладені результати лабораторно-промислової перевірки результатів дослідження, які спрямовані на перевірку теоретичних залежностей для визначення конструктивних та установочних параметрів при нарізанні пил з нерівномірним кроком заданої точності на зубофрезерному верстаті.

Промислові випробування передбачали визначення перспективності нарізання зубів дискових пил з нерівномірним кроком обкатними дисковими фрезами в порівнянні зі способами по методу копіювання.

Перевірка результатів теоретичних досліджень здійснювалась на незагартованих заготовках $\varnothing 215\text{мм}$, с попередньо обробленими торцями, на яких нарізались групи зубів остаточних розмірів.

Як показали розрахунки та дослідження геометрії різальної частини обкатних фрез в процесі роботи, найбільш несприятливим геометричним параметрами характеризується робота фрез с числом зубів $Z_0=4$. Тому для виготовлення була обрана відрізна пила з загальним числом зубів $Z=96$, числом зубів в групі $Z_{gr}=4$, нерівномірністю зубів у групі $\Delta=30\%$ та товщиною $B=2,6\text{мм}$.

Для виготовлення цієї пили обрана обкатна фреза діаметром $D_\phi=132\text{ мм}$.

Після нарізання зубів пили здійснена серія вимірів параметрів (γ , θ , ε_i ,

R, r). Результати вимірювань підтвердили положення теоретичних досліджень, які покладені в основу розробки методики проектування дискових обкатних фрез.

Показано, що розроблена теорія являє собою основу розробки обкатних фрез, осі яких встановлюються перпендикулярно до сей оброблюваних пил, для обробки будь-якого профілю зубів пили та програм для їх виготовлення на верстатах з ЧПК.

Методика проектування дискових обкатних фрез для обробки пил з нерівномірним кроком знайшла своє відображення в структурній схемі САПР обкатних фрез.

Проектування дискових обкатних фрез здійснюється з застосуванням програми SolidWorks шляхом створення параметричної моделі для побудови твердотільної 3D моделі та отримання креслення.

Для реалізації автоматизованого проектування фрез розроблені відповідні рекомендації.

В умовах ТОВ «Вінницький інструментальний завод» за рекомендаціями виготовлені дискові обкатні фрези з нерівномірним кроком (нерівномірність $\Delta=30\%$) і числом зубів в групі $Z_{gr}=4$ та $Z_{gr}=6$. Похибка за кроком виготовлених ними відрізних пил не перевищувала $\pm 6'$ при нормі за ДСТУ ІСО 2768-1-2001 – $\pm 20'$.

На підприємстві ТОВ «Костянтинівський завод механічного обладнання» з використанням алгоритму та програми створена параметрична модель фрези. В програмі SolidWorks побудована 3D модель та креслення фрези діаметром $D_\phi=90$ мм з числом зубів в групі $Z_{gr}=4$ та $\Delta=30\%$.

За кресленням виготовлена фреза, якою на зубофрезерному верстаті оброблена відрізна пила. Проведена на підприємстві ТОВ «Костянтинівський завод механічного обладнання» перевірка результатів досліджень підтвердила їх достовірність.

Розроблений та запатентований спосіб на основі методу обкочування (патент № 104229 Україна), який дозволив виготовлення відрізних пил з нерівномірним кроком, що характеризуються підвищеною динамічною стійкістю, та дозволяє виготовляти ці пили без додаткових витрат на спеціальне обладнання. Його реалізація забезпечується розробкою дискової обкатної фрези (патент № 106173 Україна).

Результати роботи використовуються у навчальному процесі КПІ ім. Ігоря Сікорського при підготовці фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня магістр за спеціальністю «131 - прикладна механіка» та спеціалізацією «Інструментальні системи та технології формоутворення деталей» і використовуються при викладанні дисциплін «Теорія проектування інструменту» та «Автоматизоване проектування різального інструменту», а також в курсовому і дипломному проектуванні.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше розроблена теорія проектування дискових обкатних фрез для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком заданого профіля їх стружкових канавок та з забезпеченням точності за кроком, яка включає визначення:

- координат базових точок різальних кромок фрези при різних її установах відносно осі пили;
- мінімально допустимого діаметра фрези та діаметра з врахуванням переточувань;
- умов забезпечення утворення радіуса западин стружкових канавок відрізних пил;
- зміщення вершин зубів обкатної фрези відносно осьової лінії, що забезпечує обробку кожної стружкової канавки зубів в групі з нерівномірним кроком.

2. Показано, що радіуси западин канавок пили відповідають радіусам перехідних кривих, сформованих обкатною фрезою. Вперше виведені залежності для їх розрахунку;

3. Встановлено залежності зміни геометричних параметрів вздовж різальних кромek в процесі роботи обкатної фрези від числа зубів з нерівномірним кроком в групі, діаметра та числа зубів відрізної пили.

Ключові слова: дискові обкатні фрези, відрізні пили, фрези, нерівномірний крок, обкочування, обкатний рух, різальний інструмент, точність по кроку.

Список публікацій здобувача

1. Равская Н.С., Бабенко А.Е., Боронко О.А., Парненко В.С. Проектирование прогрессивных конструкций дисковых пил с неравномерным шагом зубьев. Донецкий государственный технический университет. Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Донецк, 2000. №13. С. 134-137.
2. Спосіб нарізування дискових пил з нерівномірним кроком зубів: пат. и 2015 02233 Україна: МПК (2016.01), В23F 5/00. № 104229; заявл. 13.03.2015; опубл. 25.01.2016, Бюл. № 2. 4 с.
3. Обкочувальна фреза для нарізування дискових пил з нерівномірним кроком зубів: пат. и 2015 07365 Україна: МПК (2016.01), В23F 5/00. №106173; заявл. 22.07.2015; опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8. 4 с.
4. Парненко В.С. Расчет параметров впадин обкаточных дисковых фрез для изготовления пил с неравномерным шагом. Вестник Национального Технического Университета Украины "КПИ", серия Машиностроение. Киев, 2014. №72. С.152-155.
5. Парненко В.С., Равська Н.С., Охрименко О.А. Особливості виготовлення відрізних дискових фрез на зубофрезерному верстаті. XIV Міжнародна науково-технічна конференція: Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. (м. Краматорськ, 30 трав. - 1 черв. 2016 р.). Краматорськ. 2016. С.70-71.
6. Равська Н.С., Парненко В.С. Особливості заточки фасонних дискових обкатних фрез для обробки багатозубих виробів з нерівномірним кроком по задній поверхні. XV Міжнародна науково-технічна конференція: Важке

машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. (м. Краматорськ, 30 трав. – 1 черв. 2017 р.). Краматорськ. 2017. С.72-73.

7. *Парненко В.С.*, Равська Н.С. Визначення кінематичного переднього кута зуба дискової обкатної фрези для обробки багатозубих виробів з нерівномірним кроком. XVII Міжнародна науково-технічна конференція: Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта. (м. Одеса, 21 черв. 2016р.). Одеса. 2016. С.249-250.

8. *Парненко В.С.* Классификация изделий машиностроения прямолинейного профиля зубьев. «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». Міжнародний збірник наукових праць Донецького Національного Технічного Університету. Донецьк, 2014. №2 (48). С.29-37

9. Равська Н.С., *Парненко В.С.* Дослідження геометрії задньої поверхні різальної частини дискових обкатних фрез з нерівномірним кроком. Науковий журнал «Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки». Київ, 2018. Том 29 (68). № 2. С.21-31.

10. Равська Н.С., *Парненко В.С.* Визначення статичних передніх і задніх кутів фасонної обкатної фрези у вершинної точки її ріжучої кромки. Збірник наукових праць. «Перспективні технології та прилади». Луцьк, 2016. №8. С.95-97.

11. Бабенко А.Е., Боронко О.А., Лорох Р., *Парненко В.С.* Влияние наклона зубьев фрезы на ее динамические характеристики. II Міжнародна конференція: Прогресивна техніка і технологія – 2001. (м. Севастополь, 28 черв. - 2 лип. 2001). Київ – Севастополь. 2001. С.77.

12. *Парненко В.С.* Определение формы режущей кромки обкаточной фрезы при взаимоперпендикулярных осях заготовки и инструмента. Сборник трудов XIX международной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике». (г. Новосибирск, 20 марта 2013). Новосибирск, 2013. С.39-46.

13. *Парненко В.С.* Анализ способов обработки дисковых многозубых инструментов. Сборник трудов XXXII международной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике». (г. Новосибирск, 19 марта 2014). Новосибирск, 2014. №3 (28). С.28-34.
14. *Парненко В.С.* Методика розрахунку кута повороту інструменту другого порядку для отримання визначеного нахилу зубів оброблюваного інструмента. Загально-університетська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів, присвяченої дню Науки. Матеріали конференції. (м. Київ, 24 лют. 2014). Київ. 2014. С. 64-66.
15. *Парненко В.С.* Определение профиля зуба дисковой пилы, обрабатываемого дисковой обкаточной фрезой. Збірник наукових праць за матеріалами міжнародної науково-практичної конференції: Інноваційні підходи і сучасна наука. (м. Київ, 24 лют. 2015). Київ. 2015. С.46-48.
16. *Парненко В.С.* Методика расчета угла поворота инструмента для получения определенного наклона зубьев обрабатываемых инструментов. Збірник наукових праць за матеріалами міжнародної конференції: Наука в епоху дисбалансів. (м. Київ, 24 лют. 2016). Київ. 2016. С.95-97.
17. *Вовк В. В., Парненко В.С.* Дослідження кінематичних геометричних параметрів передньої поверхні дискової обкатної фрези. Збірник наукових праць за матеріалами III міжнародної конференції: Наука і сучасність: виклики глобалізації. (Київ, 31 трав. 2017 р.). Київ. 2017. С.73-80.
18. *Бабенко А.Є., Равська Н.С., Боронко О.О., Парненко В.С.* Про вплив на коливання фрези кута нахилу зубців. Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. Житомир, 2000. №12. С.49-54.
19. *Бабенко А.Є., Боронко О.О., Парненко В.С.* Вимушені коливання дискової фрези. Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. Житомир, 2001. №18. С. 28-32.

ABSTRACT

Parnenko V.S. The rolling disk shaped milling cutter for machining circular saw blades with variable pitch. – Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

The dissertation for the candidate degree of technical sciences on the specialty 05.03.01 - machining processes, machines and tools. - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the issues of development of rolling disk shaped milling cutter for the machining of circular saw blades with variable pitch of a given profile of chip grooves and with the assurance of accuracy in increments.

An analysis of different types of teeth of the circular saw blades, structural parameters and their location on the working part, which are manufactured, in accordance with the standards and offered by firms manufacturers, in particular, saws with variable pitch, are given in this work. The scope of application of each type of saws, advantages and disadvantages is considered. The modern ways of machining of multi-toothed products, which also include circular saw blades, are analyzed. These ways are based on copying, rolling and touch processing methods (CNC machines).

The choice of the ways of machining of circular saw blades with variable pitch by means of disk milling cutters is substantiated. It does not require additional expenses for the purchase of specialized equipment with software control during cutting teeth of saws of this construction.

The theory of design of the disk milling cutters was developed for the machining of cutting saws with a variable pitch in the group on the basis of the general provisions of the theory of forming the surfaces of the disk milling cutters. The theory of designing of the disk milling cutters is considered on the example of machining of saws with a small tooth.

The theory of the design of disk milling cutters for the processing of the saws with a variable pitch includes the determination of the base points of the cutter edges of the cutter and their permissible external radius, depending on the design parameters of the circular saw blades. To determine the radius of transition curves in the hollows of the grooves, the design theory involves determining the parameters of the cutter installation relative to the axis of the saw.

The task of developing the construction of the milling cutter is considered based on the developed theory of the design of the rolling disk shaped milling cutter for the machining of circular saw blades with variable pitch.

During designing a rolling disk shaped milling cutter, the primary task is to determine its outer diameter, taking into account the tool sharpening. The outer diameter of the milling cutter including the tool sharpening is determined by the minimum design diameter - D_{0min} . To do this, the minimum pitch of the teeth with different number of them in the group were calculated. The recommendations for choosing the minimum acceptable pitch and determining the variable parameter Δ and the number of teeth in the group Z_{gr} , as well as the diameter D and the total number of teeth Z of the circular saw blade were given.

It is shown, what influence on the dimensions of the transition curves the constructive parameters of the saw have. It is also shown that the installation of the axis of the rolling disk shaped milling cutter to the axis of the circular saw blade is not acceptable for some standard sizes of the circular saw blade.

The development of the constructions of the milling cutter also includes the determination of the coordinates of the base points of the cutting edges of the milling cutter, the determination of the radius of each tooth and their placing relative to each other.

The coordinates of the base points A , B and C of the cutter edges of the milling cutter depend on its installation relative to the axis of the circular saw blade. They are determined based on calculation of the corresponding points of the profile of the circular saw blade.

The geometrical parameters of the cutting part are considered in the process of the machining milling cutter. It is shown that these parameters should be considered in the kinematic coordinate system. Dependences for calculating the change in the geometrical parameters of the cutting part of the milling cutter during the machining were derived. The change of these parameters was investigated. It has been established that the kinematic angles along the cutting edges depend on the number of teeth of the circular saw blade, the anterior angle, the number of teeth in the group and the diameter of the circular saw blade. It has been established that the change of the front γ and the rear α angles along the cutting edges of the milling cutter is directly opposite. During machining the cutting edge of the front surface of the saw, the angle γ increases and decreases during machining the occipital. On the contrary - the angle α decreases during the machining front surface, reaching negative values and increasing during machining occipital. To ensure favorable geometry along the cutting edges in the process of milling with $Z_0=4$ it is recommended to sharpen them with different angles: $\alpha_{Nnp} = 15^\circ$ and $\alpha_{Nnt} = 5^\circ$.

The results of the laboratory-industrial checking of the results of the research are presented. They are aimed at checking the theoretical dependences for determining the constructive and mounting parameters during machining a circular saw blades with a variable pitch of given accuracy on the gear milling machine.

Industrial tests envisaged the determination of the probability of machining the teeth of circular saw blades with a variable pitch by means of the milling cutter in comparison with the ways according to the ways of copying.

The checking of the results of theoretical researching was carried out on not hard-tempered disk $\varnothing 215$ mm, with pre-treated end faces on which the groups of teeth of final sizes were cut.

As the calculations and research of the geometry of the cutting part of the milling cutter in the process of work have shown, the most unfavorable geometric

parameters are characterized by the machining of milling cutter with the number of teeth $Z_0=4$. Therefore, a separate circular saw blade with a total number of teeth $Z=96$, number of teeth in the group $Z_{gr}=4$, variable parameter $\Delta=30\%$ and a thickness $B=2,6 \text{ mm}$ were chosen for the manufacture.

The milling cutter with a diameter $D_f=132 \text{ mm}$ was selected for the manufacture of this circular saw blades.

A series of measurements of the parameters ($\gamma, \theta, \varepsilon_i, R, r$) was performed after machining the teeth. The results of the measurements confirmed the provisions of the theoretical researches, which are the basis for the development of a method for designing milling cutter.

It is shown that the developed theory is the basis for the development of milling cutter, whose axes are installed perpendicularly to circular saw blades, for machining any profile teeth of the saws and programs for their manufacture on CNC machines.

The method of designing milling cutter for the machining of saw blades with variable pitch was reflected in the structural scheme CAD of the milling cutter.

The design of milling cutter is carried out using the SolidWorks program by creating a parametric model for constructing a solid 3D model and obtaining a drawing.

Appropriate recommendations have been developed for automated design of milling cutters.

In the conditions of LLC "Vinnitsa Instrumental Factory", according to the recommendations were made disc milling cutters with variable pitch (variable parameter $\Delta=30\%$) and the number of teeth in the group $Z_{gr}=4$ and $Z_{gr}=6$. The inaccuracy in step of saw blades made by them did not exceed $\pm 6'$ at the norm for DSTU ISO 2768-1-2001 - $\pm 20''$.

The "Konstantinovsky plant of mechanical equipment" Ltd. created a parametric model of the milling cutter using the algorithm and the program. In the

SolidWorks program, a 3D model and drawings of milling cutter with a diameter $D_f=90\text{ mm}$ with a number of teeth in the group $Z_{gr}=4$ and $\Delta=30\%$ were constructed.

According to the drawing, the milling cutter was made. The saw blades was machined on a gear milling machine. Conducted at the "Konstyantinovsky factory of mechanical equipment", checking of research results confirmed their veracity.

The developed and patented way based on the method of the rolling (Patent № 104229 Ukraine), which allowed the machining of circular saw blades with variable pitch, characterized by increased dynamic stability, also allows the manufacture of these saws without additional costs for special equipment. Its implementation is ensured by the development of the rolling disk shaped milling cutter (Patent No. 106173 Ukraine).

The results of the work are used in the educational process of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" during the training of specialists in educational and qualification level, master's degree in the field of "131 - Applied Mechanics" and specialization "Instrumental systems and technology of forming parts" and used in teaching disciplines "Theory of designing tools" and "Automated designing of the cutting tool", as well as in the course and diploma designing.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

1. For the first time, the theory of the design of the rolling disk shaped milling cutter for the machining of circular saw blades with variable pitch of a given profile of their grooves and with the provision of precision in a pitch that includes the definition:

- the coordinates of the basic points of the cutting edges of the milling cutter at various of its installations relative to the axis of the saw;
- the minimum permissible diameter of the milling cutter and diameter, taking into account the regrinding;
- conditions for the formation of the radius of the depressions of the chip grooves of saws;

- displacement of tooth tops of the milling cutter in relation to the axial line, which ensures the machining of each chip grooves in the group with an variable pitch.

2. It is shown that the radius of the chip grooves correspond to the radius of the transition curves formed by the milling cutter. For the first time deduced dependencies for their calculation.

3. The dependencies of the change of geometrical parameters along the cutting edges in the course of the machining of the milling cutter from the number of teeth with variable pitch in the group, diameter and number of teeth of the circular saw blades are established.

Key words: the rolling disk shaped milling cutter, circular saw blades, cutters, variable pitch, running in, rolling movement, cutting tool, step accuracy

ЗМІСТ

	Стор.
Перелік умовних скорочень.....	19
ВСТУП.....	22
1 АНАЛІЗ СПОСОБІВ ОБРОБКИ ВІДРІЗНИХ ПИЛ.....	29
1.1 Особливості конструкції зубів відрізних пил	29
1.2 Особливості виготовлення відрізних пил	35
1.3 Удосконалення технології виготовлення відрізних пил	42
Мета і задачі досліджень.....	46
2 ТЕОРІЯ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗУБІВ ВІДРІЗНИХ ПИЛ З НЕРІВНОМІРНИМ КРОКОМ ДИСКОВИМИ ОБКАТНИМИ ФРЕЗАМИ	47
2.1 Загальні положення теорії формоутворення відрізних пил при нарізанні зубів обкатними фрезами	47
2.2 Теорія визначення форми різальних кромek дискової обкатної фрези та її установочних параметрів для обробки заданого виробу..	49
2.2.1 Координати точок різальних кромek дискової обкатної фрези при установці її осі перпендикулярно до осі пили.....	51
2.2.2 Координати точок різальних кромek дискової обкатної фрези при нахиленої установці осі інструменту відносно осі відрізної пили.....	59
2.3 Визначення розрахункового мінімального допустимого діаметра дискової обкатної фрези.....	62
2.4 Проектування дискових обкатних фрез, що забезпечують виготовлення стружкових канавок без перехідних кривих	70
2.5 Визначення перехідних поверхонь при установці осі дискової обкатної фрези перпендикулярно до осі пили.....	74
Висновки до розділу 2.....	77
3 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ДИСКОВИХ ОБКАТНИХ ФРЕЗ З НЕРІВНОМІРНИМ КРОКОМ.....	79

3.1	Визначення параметрів нерівномірності відрізних пил.....	80
3.2	Визначення зовнішнього діаметра дискової обкатної фрези.....	85
3.2.1	Вплив конструктивних параметрів відрізної пили на розрахунковий мінімальний діаметр дискової обкатної фрези.....	85
3.2.2	Визначення зовнішнього діаметра фрези з урахуванням переточок.....	87
3.2.3	Залежність кривизни перехідних кривих та діаметрів обкатних фрез від параметрів відрізних пил	90
3.2.4	Методика визначення зовнішнього діаметра дискової обкатної фрези.....	94
3.3	Проектування дискових обкатних фрез.....	95
3.3.1	Конструктивні параметри, які розраховуються за залежностями, визначеними на основі положень теорії формоутворення.....	96
3.3.2	Конструктивні параметри залежні від параметрів різальної частини.....	99
	Висновки до розділу 3.....	101
4	ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РІЗАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ ДИСКОВОЇ ОБКАТНОЇ ФРЕЗИ В ПРОЦЕСІ ЇЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	102
4.1	Загальні положення методики визначення геометрії різальної частини дискових обкатних фрез.....	102
4.1.1	Визначення результуючого руху різання дискової обкатної фрези.....	106
4.1.2	Визначення кінематичного кута в плані.....	112
4.1.3	Визначення кінематичного переднього кута зуба фрези.....	113
4.1.4	Визначення кінематичного заднього кута зуба фрези.....	115

4.1.5 Визначення кінематичного кута нахилу ріжучої кромки зуба фрези.....	116
4.2 Дослідження геометрії передньої і задньої поверхонь різальної частини зубів дискової обкатної фрези.....	117
Висновки до розділу 4.....	130
5 ЛАБОРАТОРНО-ПРОМИСЛОВА ПЕРЕВІРКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	131
5.1 Заготовка для нарізання дискових відрізних пил	131
5.2 Прилади для вимірювання.....	134
5.3 Підготовка інструмента для нарізання пил з нерівномірним кроком.....	135
5.3.1 Дискова обкатна фреза.....	136
5.3.2 Заточування інструменту.....	137
5.4 Лабораторні випробовування.....	140
5.5 Результати вимірювань.....	143
5.6 Автоматизоване проектування дискових обкатних фрез.....	146
5.6.1 Розробка структурної схеми автоматизованого проектування дискової обкатної фрези.....	146
5.6.2 Створення твердотільної моделі та креслення.....	149
5.7 Рекомендації з автоматизованого проектування дискових обкатних фрез для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком..	151
5.8 Промислова перевірка результатів досліджень	153
Висновки до розділу 5.....	155
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	156
СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ.....	159
ДОДАТКИ.....	172

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

a	міжосьова відстань, мм
B, b	ширина відрізної пили, мм
B_{ϕ}	ширина обкатної фрези, мм
$B_{\phi i}$	зміщення вершин зубів обкатної фрези, мм
B_{cm}	ширина ступиці, мм
d_0	діаметр отвору під оправку обкатної фрези, мм
D	діаметр відрізної пили, мм
D_{0min}	мінімальний розрахунковий зовнішній діаметр обкатної фрези, мм
D_{ϕ}	зовнішній діаметр обкатної фрези, мм
D_{cm}	діаметр ступиці, мм
H_{ϕ}	висота зуба обкатної фрези, з урахуванням переточок, мм
H_i	глибина канавки зуба відрізної пили, виміряної по передній поверхні, мм
h_i	глибина канавки зуба відрізної пили, мм
L_Z	довжина зуба обкатної фрези по задній поверхні, мм
l	зміщення осі фрези відносно осі виробу, мм
n	кількість груп зубів
N_{Π}	нормаль до передньої площини
N_Z	нормаль до задньої площини
N_{ni}, N_{nc}, N_{nk}	нормалі до інструментальної, статичної та кінематичної площини різання, відповідно
P_v, P_n, P_{τ}	основна площина, площина різання і головна січна площина, відповідно
P_{ni}, P_{nc}, P_{nk}	інструментальна, статична та кінематична площина різання, відповідно
P_H	нормальна січна площина
P_S	робоча площина
$R_{\phi i}$	радіус кожного зуба обкатної фрези, мм
r	радіус заокруглення в западині зуба відрізної пили, мм

r_n	радіус кривизни перехідної кривої в западині зуба відрізної пили, мм
T, t	крок зубів, мм
$T_{окр}$	нормальний окружний крок зубів, мм
U	передавальне відношення
\bar{V}	швидкість головного руху різання в досліджуваній точці, м/хв
\bar{V}_e	швидкість результуючого руху різання в досліджуваній точці, м/хв
\bar{V}_s	швидкість подачі, м/хв
Z	кількість зубів відрізної пили, координата
Z_{gr}	кількість зубів у групі
Z_0	кількість зубів обкатної фрези, координата
α_e	задній кут у вершинній точці обкатної фрези, °
β	кут установки осі фрези, °
γ	передній кут відрізної пили, °
γ_e	передній кут у вершинній точці обкатної фрези, °
Δ	нерівномірність кроку зубів пили, %
ε_{gr}	величина нерівномірності сусідніх зубів в групі, °
$\Delta R_{\phi i}$	різниця між радіусами вершин зубів обкатної фрези, мм
ε_i	кутові кроки зубів у групі відрізної пили, °
ε_0	мінімальний кутовий крок у групі відрізної пили, °
ε_Z	нормальний кутовий крок зубів відрізної пили, °
ε_{ϕ}	кутовий крок обкатної фрези, °
θ	кут профілю стружкової канавки відрізної пили, °
ρ_{ϕ}	кут повороту обкатної фрези, °
ρ	кут повороту відрізної пили, який відповідає куту повороту обкатної фрези, °

λ	кут нахилу різальної кромки, °
φ	кут в плані обкатної фрези, °
ω	кутова швидкість обертання відрізної пили, об/хв
$\omega_{\text{ф}}$	кутова швидкість обертання обкатної фрези, об/хв
ψ	кут нахилу передньої площини відносно вертикалі в перетині, перпендикулярному осьовому, °
Ω	кут охоплюється однією групою зубів, °

ВСТУП

Актуальність роботи. Серед багатьох багатозубих виробів особливе місце займають відрізні та прорізні пили, які застосовуються в різних галузях промисловості при розрізці профілів з різних матеріалів.

Як показали дослідження роботи стандартних відрізних пил, спільно проведених кафедрами інструментального виробництва та динаміки і міцності машин ММІ Р. Лорохом, О.О. Боронком, В.Г. Панчуком, ці пили мають нестійку динаміку. В процесі їх роботи виникають значні згиняльні коливання. В результаті цих досліджень були розроблені пили підвищеної динамічної стійкості, які забезпечують зниження згинних коливань в процесі їх роботи, за рахунок нерівномірного кроку зубів у групі. Такі пили характеризуються зниженням зусиль різання, підвищеною працездатністю та продуктивністю, що досягається за рахунок покращення динаміки процесу відрізання.

Для виготовлення відрізних пил з нерівномірним кроком створені спеціальні верстати з ЧПК, на яких на загартованих заготовках нарізуються пили з будь якою нерівномірністю зубі методом шліфування.

Відсутність таких верстатів з ЧПК для нарізування зубів відрізних пил з нерівномірним кроком, стримує їх впровадження в Україні.

Останнім часом досить поширеним способом виготовлення відрізних пил є спосіб лазерного різання, який аналогічно шліфуванню на верстатах з ЧПК базується на програмному забезпеченні процесу обробки.

В першому і другому випадку обробки пил необхідне дороге обладнання, значні витрати на інструмент при шліфуванні, на електроенергію та специфічні витратні матеріали при лазерному різанні.

В зв'язку з цим виникла проблема розробки інструменту для виготовлення відрізних пил підвищеної динамічної стійкості (пил з нерівномірним кроком) без витрат на спеціальне обладнання. Такими інструментами є дискові обкатні фрези, що обробляють відрізні пили методом обкочування на універсальних зубофрезерних верстатах.

Проте теорія проектування таких фрез та теорія формоутворення ними профілю відрізних пил з нерівномірним кроком в групі відсутня. Тому розробка теорії та конструкції обкатної фрези є актуальною проблемою і має велике наукове та практичне значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» у відповідності до тематичного плану науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України і є частиною досліджень за держбюджетними темами:

№ 2914-Ф Узагальнена теорія визначення геометричних параметрів різального інструменту (державна реєстрація № 0106U002603).

№ 2912-П Розвиток теорії формоутворення поверхонь при механічній обробці (державна реєстрація № 0106U002602).

№ 2828-Ф Основи теорії проектування різальних інструментів для високошвидкісної обробки (державна реєстрація № 01150002354).

Мета і задачі досліджень. *Метою роботи є розробка дискових обкатних фрез для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком заданого профілю стружкових канавок та з забезпеченням точності за кроком.*

Задачі досліджень. Для досягнення поставленої мети визначені наступні задачі дослідження:

- провести аналіз існуючих конструкцій відрізних пил, типових профілів зубів і способів їх виготовлення;
- на основі загальної теорії формоутворення поверхонь розробити теорію проектування дискових обкатних фрез для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком заданого профілю їх стружкових канавок;

- визначити мінімально допустимий діаметр обкатної фрези та умови забезпечення нею радіуса западини стружкових канавок пили;
- враховуючи кількість зубів з нерівномірним кроком в групі та нерівномірність їх кроку визначити зовнішній діаметр фрези з урахуванням переточок;
- дослідити вплив параметрів відрізних пил на величину кривизни перехідних кривих, що формують радіус западини їх стружкових канавок та на діаметр обкатних фрез;
- розробити конструкцію дискової обкатної фрези для обробки пил з нерівномірним кроком в групі;
- провести дослідження геометричних параметрів різальної частини обкатних фрез в процесі їх роботи;
- експериментально перевірити результати теоретичних досліджень;
- розробити рекомендації з проектування дискових обкатних фрез для обробки пил з нерівномірним кроком.

Об'єкт досліджень – спосіб нарізання відрізних пил з нерівномірним кроком дисковими обкатними фрезами.

Предмет досліджень – дискові обкатні фрези з нерівномірним кроком.

Методи досліджень. Виконані дослідження базуються на теорії формоутворення поверхонь, теорії проектування різальних інструментів, методах аналітичної і диференціальної геометрії та математичної статистики. Достовірність розроблених теоретичних положень перевірено шляхом лабораторно-промислових випробувань.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше розроблена теорія проектування дискових обкатних фрез для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком заданого профіля їх стружкових канавок та з забезпеченням точності за кроком, яка включає визначення:

- координат базових точок різальних кромок фрези при різних її установках відносно осі пили;
- мінімально допустимого діаметра фрези та діаметра з врахуванням переточок;
- умов забезпечення утворення радіуса западин стружкових канавок відрізних пил;
- зміщення вершин зубів обкатної фрези відносно осьової лінії, що забезпечує обробку кожної стружкової канавки зуба в групі з нерівномірним кроком.

2. Показано, що радіуси западин канавок пили відповідають радіусам перехідних кривих, сформованих обкатною фрезою. Вперше виведені залежності для їх розрахунку;

3. Встановлено залежності зміни геометричних параметрів вздовж різальних кромок в процесі роботи обкатної фрези від числа зубів з нерівномірним кроком в групі, діаметра та числа зубів відрізної пили.

Ступінь обґрунтованості наукових положень та рекомендацій.

Висновки, наукові положення та рекомендації сформульовані на основних законах і положеннях теорії формоутворення поверхонь та механічної обробки, узагальненої теорії визначення геометричних параметрів різальної частини та методиках проектування різальних інструментів.

Експериментальні та випробувальні дослідження виконані з використанням сучасних способів та технічних засобів вимірювання та обробки їх результатів методами математичної статистики, що підтверджують достовірність теоретичних висновків.

Практична цінність результатів дисертаційної роботи.

На основі досліджень розроблена нова конструкція дискової обкатної фрези з нерівномірним кроком, призначена для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком зубів.

Розроблено спосіб обробки дисковою обкатною фрезою відрізних пил з нерівномірним кроком зубів, при якому обкатна фреза займає певне положення щодо оброблюваної пили, щоб забезпечити її обробку відповідно до технічних вимог виготовлення відрізної пили.

Розроблена методика проектування дискових обкатних фрез, яка відтворена в структурній схемі їх САПР. Розроблені алгоритми та програма побудови параметричної моделі фрези для створення твердотільної 3D моделі та проекційних креслень. На їх основі розроблені загальні рекомендації з проектування дискових обкатних фрез.

На основі методики з визначення геометричних параметрів різальної частини зуба в процесі роботи дискових обкатних фрез надано рекомендації щодо їх вибору.

Розроблений та запатентований спосіб на основі методу обкочування (патент № 104229 Україна), який дозволив виготовлення відрізних пил з нерівномірним кроком, що характеризуються підвищеною динамічною стійкістю, та дозволяє виготовляти ці пили без додаткових витрат на спеціальне обладнання з програмним керуванням. Його реалізація забезпечується розробкою дискової обкатної фрези (патент № 106173 Україна).

Особистий внесок здобувача. В дисертаційній роботі представлені результати досліджень, які автор отримав особисто: автором виконано аналіз літературних джерел з сучасного стану проблеми; запропоновані та практично перевірені положення розробленої теорії формоутворення западин зубів відрізних пил з нерівномірним кроком дисковими обкатними фрезами; визначені кінематичні геометричні параметри різальної частини дискової обкатної фрези в процесі її роботи.

Постановка задач досліджень, формулювання основних положень роботи, опрацювання структури та змісту роботи виконані разом з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались на 10 наукових конференціях з публікацією тез:

– Бабенко А.Е., Боронко О.А., Лорох Р., Парненко В.С. Влияние наклона зубьев фрезы на ее динамические характеристики. II Міжнародна конференція: Прогресивна техніка і технологія – 2001. (м. Севастополь, 28 черв. - 2 лип. 2001). Київ – Севастополь. 2001. С.77.

– Парненко В.С. Определение формы режущей кромки обкаточной фрезы при взаимоперпендикулярных осях заготовки и инструмента. Сборник трудов XIX международной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике». (г. Новосибирск, 20 марта 2013). Новосибирск, 2013. С.39-46.

– Парненко В.С. Анализ способов обработки дисковых многозубых инструментов. Сборник трудов XXXII международной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике». (г. Новосибирск, 19 марта 2014). Новосибирск, 2014. №3 (28). С.28-34.

– Парненко В.С. Методика розрахунку кута повороту інструменту для отримання визначеного нахилу зубів оброблюваного інструмента. Загально-університетська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів, присвяченої дню Науки. Матеріали конференції. (м. Київ, 24 лют. 2014). Київ. 2014. С.64- 66.

– Парненко В.С. Определение профиля зуба дисковой пилы, обрабатываемого дисковой обкаточной фрезой. Збірник наукових праць за матеріалами міжнародної науково-практичної конференції: Інноваційні підходи і сучасна наука. (м. Київ, 24 лют. 2015). Київ. 2015. С.46-48.

– Парненко В.С. Методика расчета угла поворота инструмента второго порядка для получения определенного наклона зубьев обрабатываемых инструментов. Збірник наукових праць за матеріалами міжнародної конференції: Наука в епоху дисбалансів. (м. Київ, 24 лют. 2016). Київ. 2016. С.95-97.

– Парненко В.С., Равська Н.С., Охрименко О.А. Особливості виготовлення відрізних дискових фрез на зубофрезерному верстаті. XIV Міжнародна науково-технічна конференція: Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. (м. Краматорськ, 30 трав. - 1 черв. 2016 р.). Краматорськ. 2016. С.70-71.

– Парненко В.С., Равська Н.С. Визначення кінематичного переднього кута зуба дискової обкатної фрези для обробки багатозубих виробів з нерівномірним кроком. XVII Міжнародна науково-технічна конференція: Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта. (м. Одеса, 21 черв. 2016р.). Одеса. 2016. С.249-250.

– Равська Н.С., Парненко В.С. Особливості заточки фасонних дискових обкатних фрез для обробки багатозубих виробів з нерівномірним кроком по задній поверхні. XV Міжнародна науково-технічна конференція: Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. (м. Краматорськ, 30 трав. – 1 черв. 2017 р.). Краматорськ. 2017. С.72-73.

– Вовк В. В., Парненко В.С. Дослідження кінематичних геометричних параметрів передньої поверхні дискової обкатної фрези. Збірник наукових праць за матеріалами III міжнародної конференції: Наука і сучасність: виклики глобалізації. (Київ, 31 трав. 2017 р.). Київ. 2017. С.73-80.

Перелік публікацій. За результатами досліджень опубліковано 19 наукових праць, у тому числі 6 статей у наукових фахових виданнях (з них 2 статті включені до міжнародних наукометричних баз), 2 авторських свідоцтва на корисну модель, 1 стаття в науковому журналі, 10 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, списку використаних джерел та додатків, загальний обсяг становить – 210с., список використаних джерел – 124, рисунків – 55, таблиць – 16, додатків – 6.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СПОСОБІВ ОБРОБКИ ВІДРІЗНИХ ПИЛ

Дискові відрізні пили широко використовуються для розрізання більшості сортamentу чорних та кольорових металів.

Дискові пили використовуються на підприємствах будь якого типу виробництва. Однак, для кожного з матеріалів, що обробляються, форми заготовки та режимів, слід підбирати конкретний діаметр, товщину пили, форму профілю, крок зубів та їх кількість [7,8,14,23,35,74,109].

При відрізанні та прорізанні пазів відрізні пили працюють в умовах обмеженого простору, інтенсивно зношуються та часто ламаються [102,103,115]. Тому велике значення для дискових пил має форма профілю стружкової канавки, її розміри, число і крок зубів.

Існуючі способи обробки відрізних пил багато в чому залежать від конструкції їх зубів. Так як відрізні пили поділяються на декілька типів в залежності від конструкції та розташування зубів, то особливості їх виготовлення визначаються способом та інструментом для їх обробки. При цьому першочерговою задачею є розгляд різних конструкцій зубів пил, та їх розташування на робочій частині пили.

1.1 Особливості конструкції зубів відрізних пил

Найбільші труднощі з точки зору поломки інструменту при роботі відрізних пил виникають при механічній обробці металів, так як процес відрізання будь-яких металів супроводжується значними зусиллями і температурами в зоні різання та кінематичним збудженням, що призводить до вібрацій [6,9,64,67,68,70,105]. Саме при відрізанні металів найчастіше зустрічаються виходи з ладу дискового відрізного інструменту [42,43,104,107], що в найбільшій мірі залежить від конструкції різальної частини пили, яка визначається формою зубів, стружкових канавок, їх кількістю та взаємним розташуванням [5].

На вибір форми стружкових канавок впливають оброблювальний матеріал, режими різання, форма поверхонь розміри заготовки та точність

виготовлення зубів. Процес відрізання супроводжується ударами, що призводить до значного кінематичного збудження, защемлення та поломки відрізної пили [1,2,3,4,6,9].

Міцність зуба визначається головним чином кутом загострення, який повинен бути не менш ніж $45^{\circ} - 50^{\circ}$ [26,27,31].

Конструкція різальної частини, залежно від призначення, регламентуються державними і міжнародними стандартами [11] та окремими нормативними документами фірм-виробників [106,111,113,114,123].

Слід відзначити, що за стандартом ДСТУ 2233-93 «Інструменти різальні. Терміни та визначення», дискові фрези, які призначені для розрізання різних профілів та прорізання пазів, визначаються, як відрізні пили. Їх параметри регламентуються державними та міжнародними стандартами, як дискові відрізні та прорізні фрези. Саме цей вид інструменту із швидкорізальних сталей в діапазоні діаметрів 200÷315 мм розглядається в даній роботі.

В роботах [29, 88] були досліджені пили в діапазоні цих діаметрів, товщиною $B \geq 4$ мм. Показано, що застосування пил меншої товщини при відрізанні труб, прутків та інших профілів призводить до їх поломки. В той же час розробка пил з нерівномірним кроком знижує рівень кінематичного збудження і значно зменшує товщину пили (в 1,5–2 рази). Тому в роботі розглядаються пили товщиною $B = 3 \div 6$ мм.

Стандартами ГОСТ 2679-93 (ISO 2296:2011) регламентуються вимоги до конструкцій пил (фрез) для прорізання пазів та відрізання різних профілів із сталі та чорних металів. За цими стандартами конструкції зубів пил підрозділяються на три типи: з дрібним зубом – перший тип, з середнім – другий і третій – з великим зубом.

Аналогічно цим трьом типам в DIN 1837 та DIN 1838 відповідають типи А, В, і С, які в свою чергу поділяються на типи зі спеціальним зубом.

Відмінність між типами за стандартом ISO та DIN спостерігається в позначеннях та розмірах окремих конструктивних параметрів зубів (таблиця 1.1).

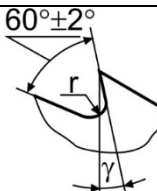
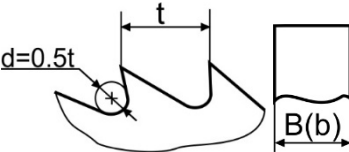
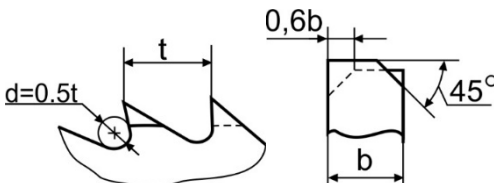
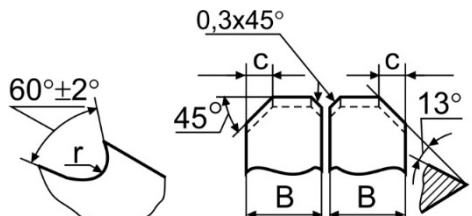
Відрізні пили згідно з існуючими державними стандартами виконуються тільки з постійним кроком зубів [11,46].

Дискові відрізні пили зарубіжних виробників, а саме фірм Blecher, Kinkelder, Stark та ін. [106,111,113,114,119,123], що виготовляються з швидкорізальної HSS сталі, відповідають стандартам DIN 1837, DIN 1838, а також внутрішнім нормативним документам. Ці відрізні пили можуть виконуватись на замовлення з нерівномірним кроком (VP).

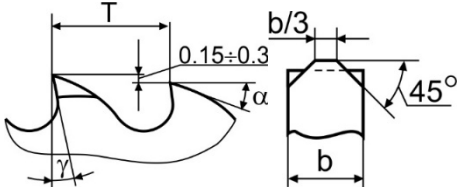
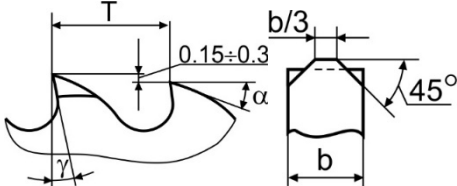
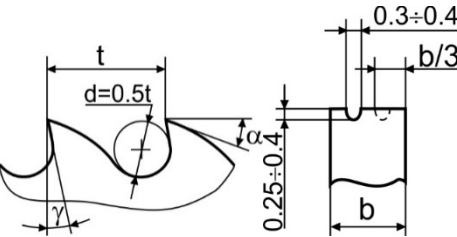
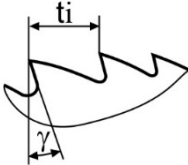
Існує ряд конструкцій відрізних пил, які захищені авторськими свідоцтвами та патентами. Всі розробки відносяться до удосконалення різальної частини дискових фрез, для покращення умов стружкоутворення шляхом оптимізації схеми подрібнення стружки. Але форма профілю зубів залишається прямолінійною, або криволінійною.

Дослідженнями встановлено, що великий вплив на працездатність дискових відрізних пил і на стійкість процесу відрізання має розподіл зубів вздовж зубчастого вінця [33,34,55,56]. Фірмою «Logosh», спільно з кафедрою «інтегрованих технологій машинобудування» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доведено доцільність використання пил відрізних з нерівномірним кроком зубів в групі. Кількість зубів пили вибирається кратною кількості груп. За дослідженнями [33,43] рекомендується нерівномірність кутового кроку зубів в групі здійснювати за законом трикутника [33, 43]. Це істотно знижує віброактивність зони різання за рахунок чого підвищується працездатність інструменту [15,23,24].

Таблиця 1.1 – Конструкції зубів відрізних пил та область їх використання.

№ п/п	Джерело	Тип профілю	Форма зуба	Конструктивні параметри зубів										Область використання
				γ	α	D	B (b)	Z	r	t(T)	f	c	h	
1	ГОСТ 2679-93 ISO 2296:2011	1		0, 5, 10	20	$\frac{200}{315}$	$\frac{3 \div 6}{3 \div 6}$	$\frac{128 \div 100}{200 \div 160}$	0,5	-	-	-	-	Розрізання тонкостінних труб та профілів нормальної твердості та міцності. Обробка матеріалів, які формують коротку стружку.
	DIN 1837	A			35	$\frac{200}{315}$	$\frac{3 \div 6}{3 \div 6}$	$\frac{128 \div 100}{200 \div 160}$	-	$\frac{5 \div 6,3}{5 \div 6,3}$	-	-	-	
		Aw спеціальний												
2	ГОСТ 2679-93 ISO 2296:2011	2		0, 5, 10	20	$\frac{200}{315}$	$\frac{3 \div 6}{3 \div 6}$	$\frac{48 \div 64}{80}$	$1,75 \div 2,25$	-	-	$1,0 \div 1,8$	-	Відрізка і прорізка сталей середньої твердості і чавуну на фрезерному універсальному і автоматизованому обладнанні,

№ п/п	Джерело	Тип профілю	Форма зуба	Конструктивні параметри зубів									Область використання		
				γ	α	D	B (b)	Z	r	t(T)	f	c		h	
										1,8 ÷ 2,3		-			використовуються як інструмент для заготівельних операцій і прорізки пазів.
DIN 1837	В спеціальний		8, 15, 25	6 ÷ 18	$\frac{200}{315}$	$\frac{3 \div 6}{3 \div 6}$	$\frac{128 \div 100}{200 \div 160}$	-	$\frac{5 \div 6,3}{5 \div 6,3}$	-	-	-	Поздовжнє та поперечне різання твердих матеріалів великого перетину. Для суцільних та профільних матеріалів		
DIN 1838							$\frac{64 \div 48}{100 \div 80}$		$\frac{10 \div 12,5}{10 \div 12,5}$						
DIN 1837	Вw спеціальний						$\frac{128 \div 100}{200 \div 160}$	-	$\frac{5 \div 6,3}{5 \div 6,3}$	-	0,6b			Різнання профільних та трубчастих матеріалів при ударних та фізичних навантаженнях. Різнання суцільних матеріалів великого перетину.	
DIN 1838							$\frac{64 \div 48}{100 \div 80}$		$\frac{10 \div 12,5}{10 \div 12,5}$						
3	ГОСТ 2679-93 ISO 2296:2011	3		0, 5, 10	20	$\frac{200}{315}$	$\frac{3 \div 6}{3 \div 6}$	$\frac{20 \div 32}{40}$	$3,75 \div 5$	-	$2,2 \div 3$	$1,0 \div 1,8$	$0,25 \div 0,5$		Відрізка і прорізка сталей середньої твердості і чавуну на фрезерному універсальному і автоматизованому обладнанні, інструмент для заготівельних операцій і прорізки пазів.

№ п/п	Джерело	Тип профілю	Форма зуба	Конструктивні параметри зубів										Область використання
				γ	α	D	B (b)	Z	r	t(T)	f	c	h	
	DIN 1837	С спеціальний		8, 15, 25	6 ÷ 18	$\frac{200}{315}$	$\frac{3 \div 6}{3 \div 6}$	$\frac{128 \div 100}{160}$	-	$\frac{5 \div 6,3}{6,3}$	-	-	-	Забезпечує оптимальну роботу при різанні з товстою (3 мм і вище) стінкою та суцільних матеріалів з великим перетином.
	DIN 1838							$\frac{64 \div 48}{80}$		$\frac{10 \div 12,5}{12,5}$				
4	Blecher, Kinkelder, Karnasch, Stark та ін.	HZ		18	12									Різання цільного профілю, або труб з товщиною стінки більше 3мм.
		BR		12, 18	6 ÷ 12									Різання труб на автоматах
		VP		Виконується на замовлення з будь-яким типом профілю										Розрізання профілю з змінною товщиною перетину, які викликають сильну вібрацію.

Використання нерівномірного кроку зубів збільшує стійкість інструменту, точність обробки і якість оброблених поверхонь. Так як нерівномірний крок дозволяє зменшити кінематичне збудження дискових інструментів, товщина таких пил може бути зменшена в порівнянні зі стандартними пилами, що дозволяє економити інструментальний матеріал.

Для визначення можливих способів виготовлення різних конструкцій зубів відрізних пил розглянемо існуючі способи і доцільність їх застосування в залежності від певних умов виготовлення.

1.2 Особливості виготовлення відрізних пил

Відомо, що багатозубі вироби обробляють методами копіювання, обкочування та дотику (обхід по контуру на установках і верстатах з ЧПК) [21,57,58,82]. Так як відрізні пили також відносяться до багатозубих виробів, то способи їх обробки аналогічні (рис.1.1).

Способи копіюванням в основному полягають в тому, що профіль або проекція профілю інструменту збігається усіма своїми точками з профілем канавки пили, що нарізується. Обробка в цьому випадку проводиться найчастіше на звичайних універсальних верстатах з використанням ділильної головки або спеціальних ділильних пристроїв [27,28,57,58,75,86].

При обробці відрізних пил способами обкочування, зубці інструменту за профілем не збігаються з утвореною ними западиною зуба пили. В цьому випадку різальний інструмент і відрізна пила, в процесі нарізання зубів, знаходяться в кінематичному зачепленні [58,73,74,98,99].

Обробка відрізних пил на установках (плазморізи, лазерні) або на верстатах з ЧПК здійснюється за рахунок програмного забезпечення.

Способами копіювання можна обробляти зуби відрізних пил як прямолінійного, так і криволінійного профілю.

Копіюванням можна виготовляти відрізні пили однокутовими або двокутовими фрезами [55] (рис 1.1, а, б).

Методом копіювання виготовляють зуби відрізних фрез як криволінійного так и прямолінійного профілю за допомогою шліфувальних кругів (рис 1.1, в). Основними перевагами процесу шліфування зуба є висока якість поверхонь та скорочення циклу виробництва. Широкому застосуванню шліфування сприяє створення алмазних і абразивних кругів на спеціальних зв'язках, що забезпечує продуктивність обробки в 3-5 разів більш високу порівняно з фрезеруванням. Однак, недоліком способу вишліфовки зубів шліфувальним кругом є висока вартість виготовлення шліфувального круга.

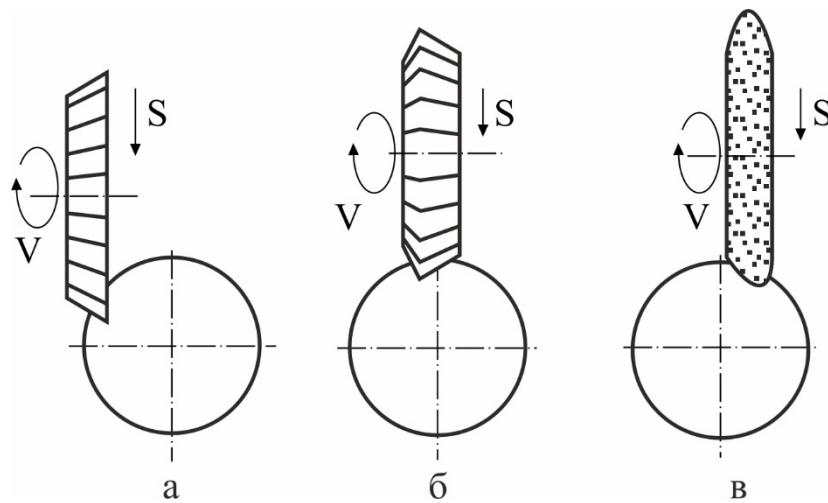


Рисунок 1.1 – Обробка зубів відрізних пил способами копіювання однокутовими фрезами (а), двокутівими фрезами (б), шліфувальними кругами (в)

Також при обробці відрізних пил за методом копіювання в результаті періодичного процесу поділу накопичується похибка кроку зубів, що при великій кількості зубів виробу часто є неприпустимим. Крім того, витрата часу на нарізання наступного зуба знижує продуктивність обробки, особливо при обробці виробів з малим кроком та великим числом зубів. Способи копіювання найбільш прийнятні для використання при обробці відрізних пил з малим числом зубів Z .

При шліфуванні зубів застосовують дискові фасонні шліфувальні круги, профіль яких збігається з профілем стружкової канавки. Істотним

недоліком використання таких кругів є необхідність їх профілювання на кожен окремий типорозмір.

При виготовленні відрізних пил в умовах багатосерійного та масового виробництва використовують спосіб листового штампування. Вирубка заготовки відрізної пили прямолінійного або криволінійного профілю зубів на пресах — високопродуктивний метод, що дозволяє отримати точну, високоякісну заготовку за короткий проміжок часу. Але даний метод має також суттєві недоліки. Він вимагає виготовлення дорогого штампового оснащення, яке періодично потребує ремонту або заміни. При виготовленні штампуванням виробів з великим числом зубів, збільшується складність виготовлення штампів, особливо це стосується виготовлення пил з нерівномірним кроком. Недоліком виготовлення заготовок відрізних пил листовим штампуванням є велика кількість відходів інструментальної сталі після рубки з листа. Штамповки з великим числом дрібних зубів, до яких відносяться відрізні пили великих діаметрів — найбільш складні у виготовленні [57,94,122].

Даний метод економічно виправданий при досить великих партіях пил, щоб була можливість окупити виготовлення і застосування дорогого оснащення та обладнання.

Таким чином з аналізу існуючих способів виготовлення відрізних пил методом копіювання можна зробити наступні висновки:

- при використанні способів за методом копіювання потрібне профілювання інструмента, так як профіль зуба відрізної пили є змінним і залежить від кількості зубів;
- точність виготовлення відрізних пил на звичайних універсальних верстатах з використанням ділильної головки або спеціальних ділильних пристроїв відносно низька через неминучі похибки виготовлення інструментів і установки їх щодо заготовки;
- при використанні шліфувальних кругів недоліком є висока вартість виготовлення шліфувального круга;

- при виготовленні штампуванням заготовок з великим числом зубів, збільшується складність виготовлення штампу;

При обробці відрізних пил також можна застосовувати способи обкочування [30,41,57,75]. Обкатні інструменти забезпечують високу продуктивність, можливість автоматизації процесу обробки, точність одержуваних виробів.

Можливо відрізні пили оброблять методом обкочування стандартними черв'ячними фрезами, при якому фреза і заготовка обертаються навколо своїх осей [22, 23, 33, 99]. Рухи обертання заготовки і фрези кінематично пов'язані один з одним і можуть бути зведені до кочення з ковзанням гіперболоїда пов'язаного із заготовкою по гіперболоїду пов'язаному з інструментом. В цьому випадку відносний рух заготовки та інструменту буде миттєвим гвинтовим рухом. Крім двох обертань на верстаті здійснюється рух подачі, який спрямовано при обробці прямозубих виробів уздовж осі обертання заготовки. В результаті такої кінематики черв'ячна фреза не має переміщень пов'язаних з діленням [58,74], як при обробці методом копіювання, що пояснює високу продуктивність процесу і вищу точність колового кроку зубів оброблюваного виробу. До переваг черв'ячної фрези відноситься також те, що вона не є інструментом постійного встановлення і при експлуатації може переміщатися уздовж своєї осі при зношуванні, що істотно збільшує загальний термін служби інструменту.

До недоліків черв'ячних фрез відноситься те, що ними неможливо обробити зуб, який має позитивний передній кут. Тому черв'ячні фрези можна використовувати для обробки тільки відрізних пил, які мають профіль зубів з переднім кутом, рівним нулю [85,86].

Для того щоб обробити дискові вироби з великою кількістю зубів та позитивними передніми кутами проф. Сахаровим Г.Н. розроблені черв'ячні фрези [87], які профілюють западину зуба за перехідною кривою, або використовують модифікацію відносних рухів черв'ячної фрези і заготовки.

Однак необхідно враховувати, що вершина зуба такої черв'ячної фрези інтенсивно зношується, що знижує стійкість інструменту і точність обробки. Введення модифікації рухів в процесі обробки відповідно ускладнює кінематику верстата.

Цього недоліку позбавлені черв'ячні фрези постійної установки (рис.1.2), що працюють методом обкатки, які призначені для отримання прямолінійного профілю виробу без перехідних кривих [38,77].

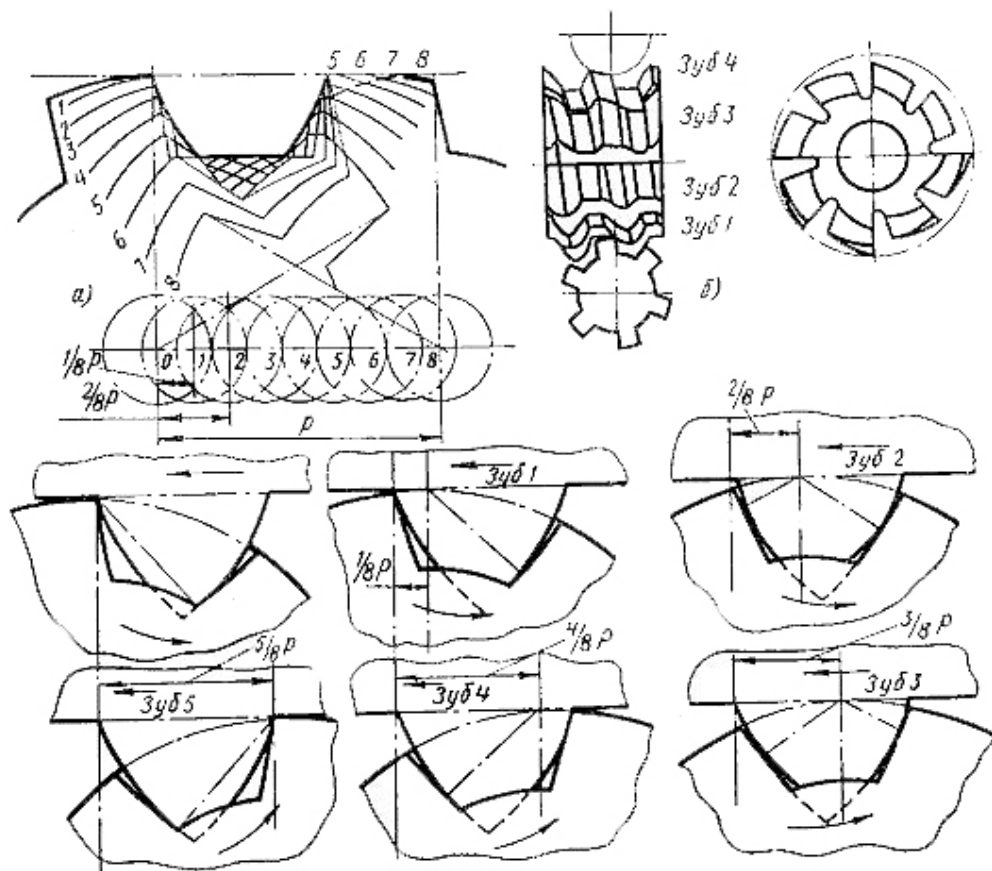


Рисунок 1.2 - Схема роботи зубів фрези постійної установки [64]

У цьому випадку формування профілю виробу відбувається, як правило, одним профілюючим зубом, всі інші зуби тільки вирізають матеріал западини зуба, не стикаючись з кінцевим профілем виробу. Недоліком фрез постійної установки є складність конструкції, а також те, що вони мають профілюючий зуб, який утворює кінцевий профіль виробу та не допускають переміщення на оправці і вимагають певної установки

щодо оброблюваної заготовки, що ускладнює експлуатацію даного інструменту [75,77,78,79,80].

Особливим конструктивним різновидом таких фрез є спеціальна фреза постійної установки (рис.1.3).

Ці фрези застосовуються для нарізування внутрішніх і зовнішніх зубів різних циліндричних виробів [81,86]. Їх застосовують здебільшого при фрезеруванні виробів великих розмірів. Спеціальні фрези постійної установки відрізняються від звичайних черв'ячних фрез цього виду тим, що їх чорнові зубці розташовані на конічній гвинтовій лінії та вершини яких зрізані, утворюючи забірний конус. В цьому випадку чорнові зубці виконують функцію забірнього конуса. При застосуванні цих фрез остаточне утворення профілю западини проводиться останнім профілюючим зубом, різальні кромки якого мають форму нарізуваної западини.

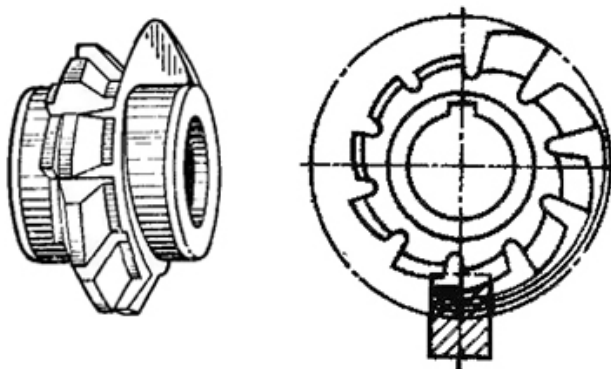


Рисунок 1.3 – Спеціальні фрези постійної установки [86]

Незважаючи на високу продуктивність, спеціальні фрези постійної установки мають порівняно мале поширення. Виготовлення таких фрез, особливо при малих розмірах зубів, утруднено.

В роботі [37] запропонований спосіб нарізування храпових коліс дисковою фасонною обкатною фрезою при взаємному обкатному русі колеса та фрези. За формою храпове колесо - це зубчасте колесо, що має несиметричний прямолінійний профіль зуба з упором на одну сторону, одна

сторона зуба полого, а інша – з піднутренням. Сторона зуба, яка має піднутрення аналогічна профілю зуба відрізних пил з переднім кутом.

Проте цей спосіб не вирішує питання обробки відрізних пил з нерівномірним кроком.

В роботі [33] був розроблений спосіб формоутворення криволінійного профілю зубів відрізних пил шліфувальними кругами на спеціальних верстатах з ЧПК.

Виготовлення зубів відрізних пил в такий спосіб вимагає не тільки спеціальних верстатів з ЧПУ, але великих витрат на інструмент.

Ще один із існуючих способів обробки відрізних пил – це плазмova різка, при якому різальним інструментом є струмінь газу, перетворений в плазму електричною дугою [15,53,92,118].

Одна з головних переваг плазмової різки є швидкість обробки, а значить і продуктивність. Плазморізи працюють в 4 рази швидше лазерних установок, в 10 разів швидше механічної обробки. За допомогою плазмової різки є можливість обробки листів металу товщиною від 1 до 150 мм.

Сучасні верстати дозволяють виготовляти вироби високої точності.

Але при плазмовій різці листового матеріалу виникає оплавлення матеріалу, що потребує, при подальшому загострюванні різальної частини, зняття великих припусків, а також при плазмовій різці виникає нахил краю різку близько 3-5 градусів, крім того може бути незначне прожарювання краю на глибину 0,5 - 1,5 мм.

Спосіб лазерного різання листового металу останнім часом став досить поширеним в виробництві відрізних пил. До переваг лазерного різання варто віднести в першу чергу високу якість одержуваних заготовок [12,83,84,108], а програмна оптимізація розкрою листа, істотно заощаджує інструментальну сталь.

Проте при лазерному нарізанні зубів пили необхідне дороге обладнання, та значні витрати на електроенергію, економічна доцільність застосування якого, можлива при дуже інтенсивному його використанні в

тих областях виробництва, де воно незамінне. Експлуатація високовартісного обладнання потребує підготовленого, кваліфікованого персоналу, для роботи, обслуговування, технологічної підготовки. Для роботи верстата лазерного різання необхідні специфічні витратні матеріали: гази високої чистоти, спеціальні масла, рідини і т. д. Ще один недолік такого методу - неможливість різку листа металу товщиною більше 6-8 міліметрів [12]. Лазерна різка дорожче плазмової різки і тим більше вирубки заготовок.

Проте лазерна різка дозволяє відійти від виготовлення дорогого штампового оснащення для виготовлення всього лише однієї пили.

При використанні лазерної різки головними недоліками є дороге обладнання, та значні витрати на електроенергію. Продуктивність обробки досить низька через те, що за один цикл обробки лазер вирізає тільки одну пилу.

Таким чином, проаналізувавши можливі способи та особливості обробки відрізних пил можна зробити висновки, що для підвищення точності виготовлення та для зменшення витрат на інструментальний матеріал доцільно виготовляти відрізні пили способом обкочування дисковими фрезами.

Особливо актуальною є задача розробки прогресивного способу і відповідного інструменту для обробки відрізних пил з великим числом зубів, що мають позитивні передні кути та нерівномірний крок.

Для того, щоб вирішити питання можливості обробки відрізних пил з нерівномірним кроком треба проаналізувати обробку способом обкочування дисковими обкатними фрезами відрізних пил з рівномірним кроком.

1.3 Удосконалення технології виготовлення відрізних пил

Переваги дискових обкатних фрез - порівняно висока стійкість, так як кожен зуб фрези є профілюючим. Перевага таких фрез полягає так само, в

тому, що вони можуть обробляти вироби з позитивними передніми кутами, до яких, за своєю конструкцією профілю, відносяться дискові відрізні пили.

Перевагою дискових обкатних фрез з прямолінійними різальними кромками є їх технологічність, можливість оснащення твердим сплавом, простота переточування як по передній, так і по задніх поверхнях. Як і інші обкатні інструменти, обкатні фрези забезпечують високу продуктивність і точність за кроком оброблених виробів, яка визначається і залежить від точності зубофрезерного верстата, і слабо залежить від точності виготовлення обкатної фрези [37].

Розглянуті конструкції обкатних фрез (рис.1.5) були розроблені і досліджені стосовно виготовлення храпових коліс, які являють собою диски з рівномірним кроком зубів. Таким чином, обробку будь яких дисків з рівномірним кроком зубів можна здійснювати дисковою фрезою при взаємному обкочувальному русі колеса і фрези.

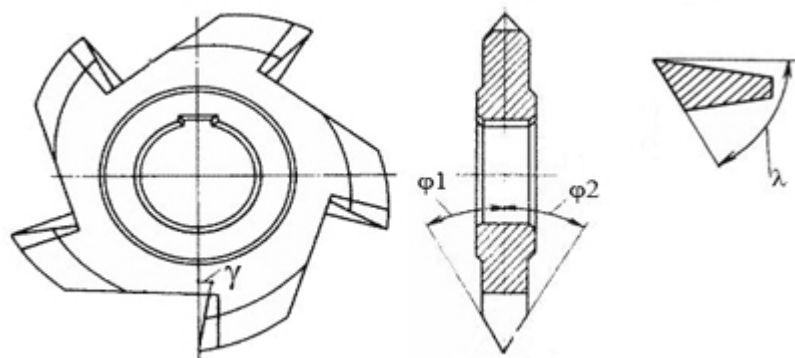


Рисунок 1.5 - Конструкція дискової обкатної фрези для виготовлення храпових коліс [37,72,80]

Такі дискові обкатні фрези проектувалися на базі багатозахідного «глобоїдного» вихідного черв'яка, що має лінійний контакт з поверхнею деталі [75]. При перетворенні вихідного черв'яка в різальний інструмент, на кожному його витку формується тільки один зуб фрези, що дозволяє створювати дискову фрезу, яка працює методом обкатки.

Схема нарізування дисковою обкатною фрезою храпового колеса наведена на рисунку 1.6. При цьому фрезу встановлюють під кутом τ

відносно торцьової площини колеса, а передня поверхня зуба фрези нахилена до основної площини під переднім кутом γ , який знаходиться за певною залежністю. В процесі обробки колесо обертається навколо своєї осі з кутовою швидкістю ω_2 , а дискова фреза обертається з кутовою швидкістю ω_1 . На рисунку 1.6 система координат XYZ пов'язана з виробом, система координат $X_0Y_0Z_0$ пов'язана з обкатною фрезою, A – відстань між осями виробу та обкатної фрези, β – половина кута профілю багатозубого виробу, $E_2M_2B_2$ профіль виробу, $h_1, h_2, h_3, L_1, L_2, L_3$ – відстані [37,38,80].

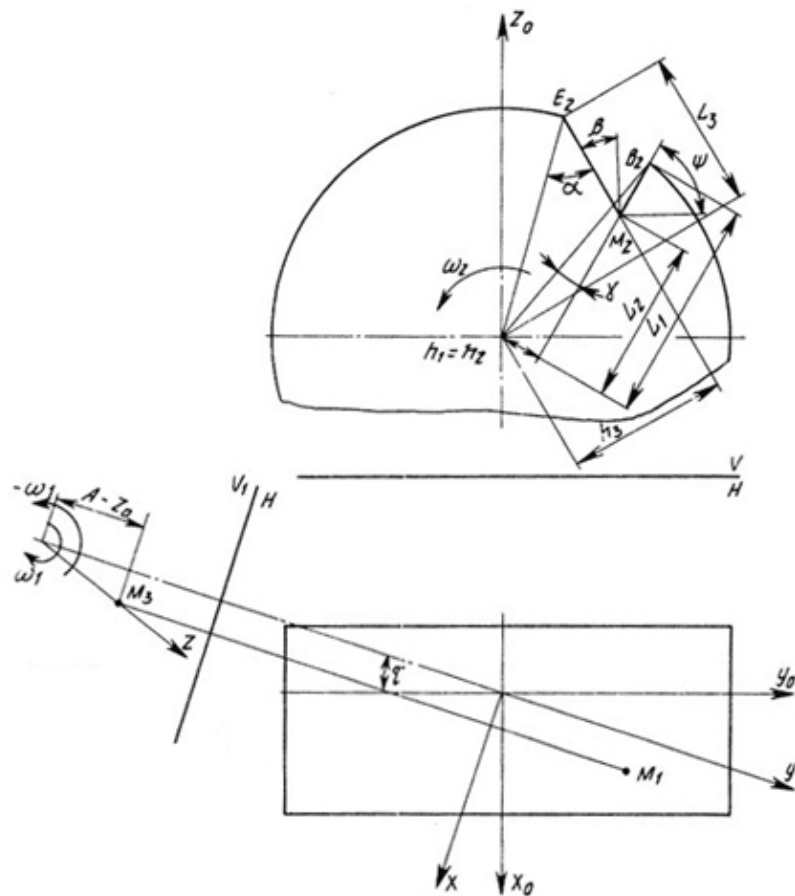


Рисунок 1.6 - Схема нарізування дисковою обкатною фрезою храпового колеса [38,80]

При цьому способі за один оберт дискової обкатної фрези обробляється певна кількість западин зубів храпового колеса. Чим більша кількість зубів дискової обкатної фрези, тим меншу кількість обертів здійснює фреза [37,38,80].

Як вже зазначалося, основні положення теорії проектування дискових обкатних фрез були розроблені для обробки багатозубих виробів типу храпових коліс, та повністю можуть бути використані для обробки дискових відрізних пил з рівномірним кроком зубів.

Враховуючи те, що кожен зуб обкатної дискової фрези обробляє певну западину на храповому колесі, на основі цієї теорії можна розробити дискові обкатні фрези для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком зубів.

Однак, можливості дискових обкатних фрез при обробці відрізних пил з нерівномірним кроком зубів не досліджені.

В роботі [33], доведено доцільність використання відрізних пил з нерівномірним кроком зубів, та показано, що з точки зору критерію динамічної стійкості при діаметрах від 200 мм до 315 мм та великої кількості зубів цих відрізних пил, вони мають нерівномірний крок та певну кількість зубів у групі, які розташовані за визначеним законом розподілу. Відрізні пили з нерівномірним кроком зубів можуть мати кількість зубів у групі 4, 6 або 8 [33].

Якщо обробляти відрізні пили з нерівномірним кроком дисковими обкатними фрезами за прикладом обробки храпових коліс, як зазначено в роботі [37], то теоретично така фреза повинна мати кількість зубів, яка дорівнює кількості зубів у групі відрізної пили та нерівномірний крок. Кожен зуб такої фрези буде профілюючим, та при одному оберті обкатної фрези вона повинна обробити задану кількість зубів у групі на відрізній пилі. Оскільки висота профілю кожного зуба у групі відрізної пили різна, кожен зуб обкатної фрези буде матиме свої розміри.

Для цього необхідно на основі загальної теорії формоутворення поверхонь при механічній обробці розробити теорію формоутворення зубів відрізних пил з нерівномірним кроком дисковими обкатними фрезами.

Мета і задачі досліджень

Метою роботи є розробка дискових обкатних фрез для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком заданого профілю стружкових канавок та з забезпеченням точності за кроком.

Задачі досліджень. Для досягнення поставленої мети визначені наступні задачі дослідження:

- провести аналіз існуючих конструкцій відрізних пил, типових профілів зубів і способів їх виготовлення;
- на основі загальної теорії формоутворення поверхонь розробити теорію проектування дискових обкатних фрез для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком заданого профілю їх стружкових канавок;
- визначити мінімально допустимий діаметр обкатної фрези та умови забезпечення нею радіуса западини стружкових канавок пили;
- враховуючи кількість зубів з нерівномірним кроком в групі та нерівномірність їх кроку визначити зовнішній діаметр фрези з урахуванням переточок;
- дослідити вплив параметрів відрізних пил на величину кривизни перехідних кривих, що формують радіус западини їх стружкових канавок та на діаметр обкатних фрез;
- розробити конструкцію дискової обкатної фрези для обробки пил з нерівномірним кроком в групі;
- провести дослідження геометричних параметрів різальної частини обкатних фрез в процесі їх роботи;
- експериментально перевірити результати теоретичних досліджень;
- розробити рекомендації з проектування дискових обкатних фрез для обробки пил з нерівномірним кроком.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРІЯ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗУБІВ ВІДРІЗНИХ ПИЛ З НЕРІВНОМІРНИМ КРОКОМ ДИСКОВИМИ ОБКАТНИМИ ФРЕЗАМИ

2.1 Загальні положення теорії формоутворення відрізних пил при нарізанні зубів обкатними фрезами

Теорію формоутворення профілів стружкових канавок дискових відрізних пил з нерівномірним кроком розглянемо на прикладі прямолінійної форми зуба, що відповідає пилам з дрібним зубом.

В даному розділі розглядається визначення форми різальних кромek дискової обкатної фрези, її допустимого мінімального зовнішнього діаметра та координат базових точок різальних кромek для обробки стружкових канавок без перехідних кривих.

Згідно положень теорії формоутворення поверхонь обробка зубів пил обкатними фрезами відноситься до схеми третього класу, яка зводиться до кочення з ковзанням гіперболоїда по гіперболоїду.

Основні положення теорії формоутворення багатозубих виробів до яких відносяться і пили з рівномірним кроком, дисковими обкатними фрезами викладені в роботі [37] на прикладі формоутворення зубів храпових коліс з прямолінійним профілем зубів. В цьому випадку розглядаються неперервні рухи обертання фрези і виробу, кінематично пов'язані один з одним.

При обробці відрізних пил з числом зубів Z , обкатна фреза і заготовка обертаються навколо своїх осей (рис. 2.1). При повороті на один зуб фрези заготовка пили також повертається на один зуб [50,80]. Для однозубої фрези одному її оберту відповідає поворот пили на $1/Z$ оберту. Для фрези, що має Z_0 зубів:

$$\frac{\omega}{\omega_{\phi}} = \frac{Z_0}{Z} = U \quad (2.1)$$

де ω — кутова швидкість обертання заготовки;

ω_ϕ — кутова швидкість обертання дискової обкатної фрези.

У відповідності з рівнянням (2.1), кути повороту обкатної фрези і заготовки пили пов'язані залежністю

$$\frac{\rho}{\rho_\phi} = \frac{Z_0}{Z} = U \quad (2.2)$$

де ρ - кут повороту виробу за певний проміжок часу;

ρ_ϕ - кут повороту дискової обкатної фрези, що відповідає повороту пили на кут ρ , за той же проміжок часу.

Крім обертальних рухів при обробці здійснюється повільний рух подачі, який при обробці прямозубих пил буде прямолінійно-поступальним [50]. Рух подачі призводить до ковзання поверхні виробу "самої по собі" і не впливає на характер контактування вихідної інструментальної поверхні і поверхні виробу.

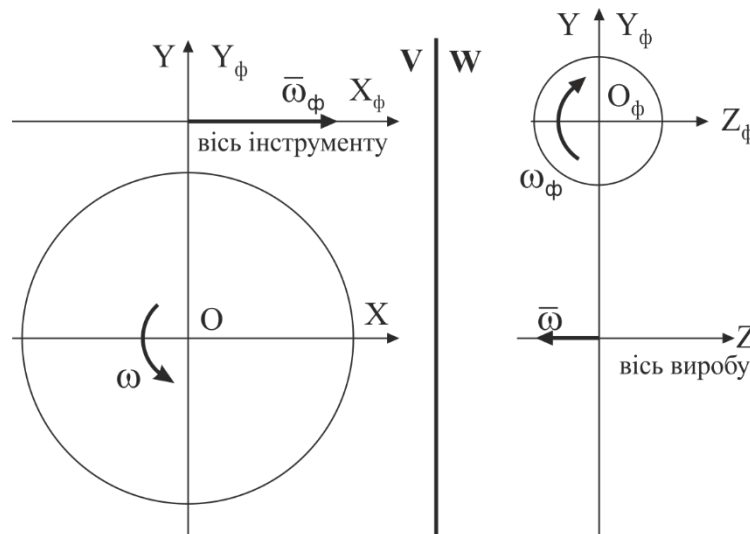


Рисунок 2.1 - Схема обробки багатозубих виробів на зубофрезерному верстаті

Проте, як показав аналіз, багатозубі вироби з рівномірним кроком, в тому числі і пили являють собою окремий випадок виробів з нерівномірним кроком.

В основу розробки дискових обкатних фрез покладена теорія формоутворення одного профілю, який в залежності від кількості зубів обкатної фрези рівномірно розташовують по колу.

Для того, щоб отримати нерівномірний крок зубів пили, дискова обкатна фреза проектується також з нерівномірним кроком зубів. Величина нерівномірності кутового кроку зубів дискової обкатної фрези залежить від необхідної нерівномірності кроку зубів виробу. Вважаємо, що пила має чотири зуба у групі, тоді кутові кроки зубів оброблюваного виробу будуть рівними $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{13}, \varepsilon_{14}$. Відповідно кутові кроки дискової обкатної фрези розраховуються таким чином:

$$\varepsilon_{\phi 1} = \frac{\varepsilon_{11}}{U_{11}}, \quad \varepsilon_{\phi 2} = \frac{\varepsilon_{12}}{U_{12}}, \quad \varepsilon_{\phi 3} = \frac{\varepsilon_{13}}{U_{13}}, \quad \varepsilon_{\phi 4} = \frac{\varepsilon_{14}}{U_{14}} \quad (2.3)$$

Саме визначення значень кутових кроків покладене в основу вихідних даних для формоутворення дискових обкатних фрез з нерівномірним кроком зубів. При формоутворенні дискових обкатних фрез з нерівномірним кроком розглядаються два варіанти — установка осі дискової обкатної фрези, перпендикулярно до осі відрізної пили або нахилена що до осі пили.

При розробці теорії формоутворення зубів відрізних пил з нерівномірним кроком дисковими обкатними фрезами виникає задача визначення різальних кромок фрези, тобто її координат.

2.2 Теорія визначення форми різальних кромок дискової обкатної фрези та її установочних параметрів для обробки заданого виробу

Дискові обкатні фрези проектуються на основі вихідної інструментальної поверхні з лінійним контактом з поверхнею виробу [58, 74].

При визначенні вихідної інструментальної поверхні розглядається рух пили відносно інструменту. Як відомо, два взаємопов'язаних обертання призводять до гвинтового руху [58,74]. Оброблювальна поверхня пили з прямими зубами обмежується двома площинами, одна з яких є передньою площиною оброблюваного зуба пили, друга площина є потиличною. З точки

зору роботи фрези важливо забезпечити правильну обробку передньої площини і отримати необхідний передній кут γ зубів пили.

Точність обробки потиличної площини допускається менша. Тому при проектуванні дискових обкатних фрез можна наближено визначати профіль фрези, пов'язаний з обробкою потиличної площини. Передню ж площину необхідно сформувати точно. Як було сказано вище, в будь-який момент часу передня площина зуба пили щодо інструменту (дискової обкатної фрези) здійснює миттєвий гвинтовий рух.

Відомо, що при гвинтовому русі площини характеристикою буде пряма лінія [58,74]. Іншими словами, в будь-який момент часу інструментальна поверхня і передня площина оброблюваного зуба пили будуть дотикатися один до одного по прямій лінії (характеристиці), тобто лінії контакту поверхні деталі Д і вихідної інструментальної поверхні, знайденої в певний момент часу при певному взаємному розташуванні поверхні Д і вихідної інструментальної поверхні І. Проектуючи дискову обкатну фрезу як різальну кромку, що формує передню площину зуба оброблюваної пили, доцільно прийняти характеристику, яка спрощує профілювання такого інструменту [58,74].

Те, що геометрично точна дискова обкатна фреза при обробці зубів пили прямолінійного профілю (табл.1.1) має прямолінійну різальну кромку, спрощує технологію її виготовлення і переточки в процесі експлуатації.

Кожен зуб такої фрези буде профілюючим та матиме свої параметри. Розглянемо визначення координат точок прямолінійних різальних кромок обкатної фрези в залежності від розподілу зубів у групі відрізної пили при установці осі дискової обкатної фрези перпендикулярно до осі виробу [22,49,50,56].

2.2.1 Координати точок різальних кромek дискової обкатної фрези при установці її осі перпендикулярно до осі пили

При визначенні координат точок різальних кромek дискової обкатної фрези при установці її осі перпендикулярно до осі відрізної пили вважаються відомими:

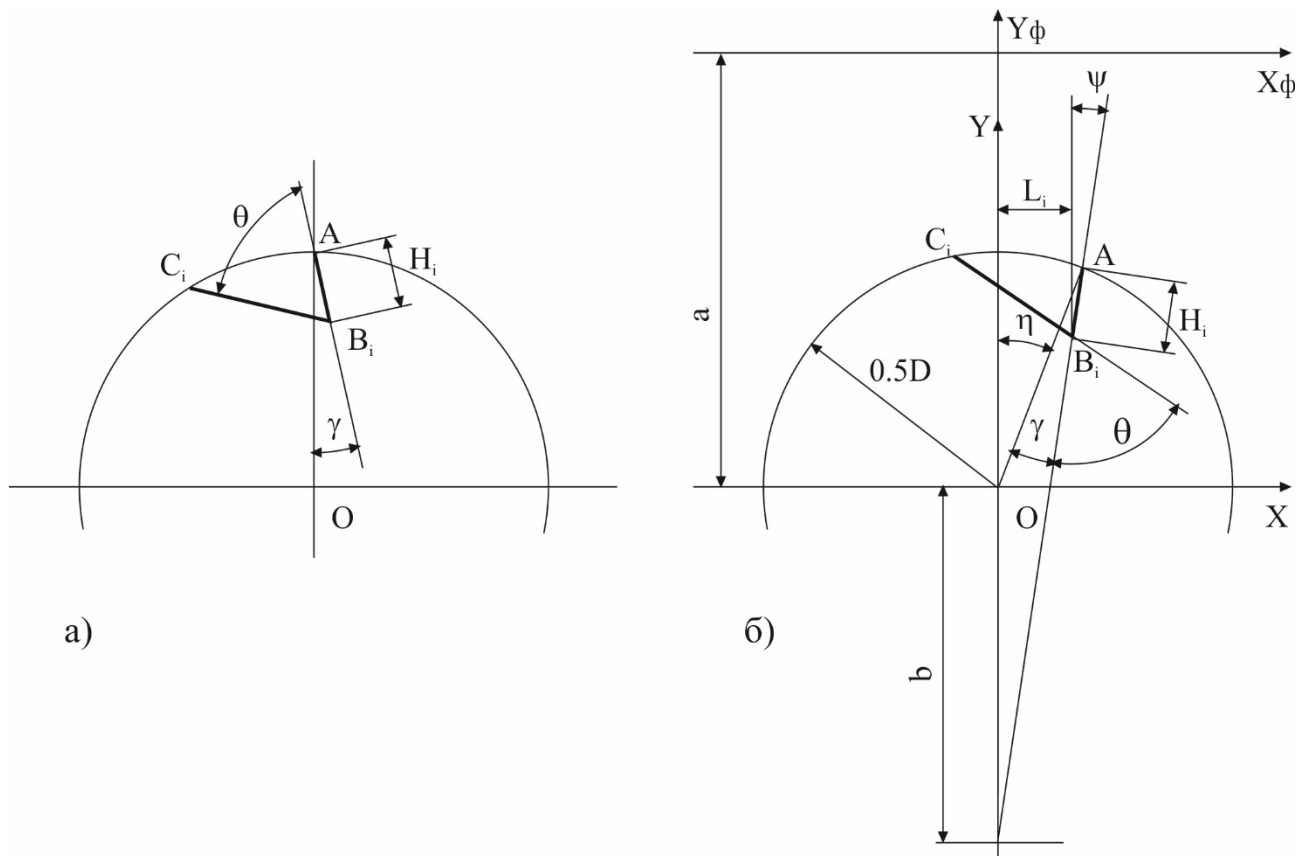
- форма кожного профілю зуба у групі ($A_i B_i C_i$, рис.2.2а);
- передній кут зубів пили γ , який приймається постійним для кожного профілю зуба у групі;
- кут профілю пили θ , також є постійним для кожного профілю зуба у групі;
- діаметр оброблюваної відрізної пили - D ;
- кутовий крок кожного зуба у групі - ε_i ;

Розглянемо формоутворення передньої площини зуба пили (рис.2.2- а), положення якої визначається переднім кутом γ .

Для забезпечення заданого переднього кута γ зубів пили, необхідно повернути пилу навколо її осі до положення зображеного на рис.2.2-б [74,58].

Передня площина, профіль якої $A_i B_i$, в результаті повороту йде під кутом ψ . Як що передня площина відрізної пили в результаті повороту займе положення, при якому кут $\psi=0$, профіль зуба обкатної фрези в перетині перпендикулярному її осі в цьому випадку буде відповідати «однокутовий» формі, та обробка передньої площини AB не буде можлива. Таким чином кут ψ повинен бути більше «0», та профіль зуба обкатної фрези буде відповідати «двокутовий» несиметричній формі. Але з точки зору технології виготовлення доцільно проектувати дискові обкатні фрези з симетричним профілем зубів. Тоді кут ψ приймає цілком певне значення та буде рівний $\psi = 0,5\theta$. Кут η обертання точки A профілю зуба пили навколо її осі в цьому випадку дорівнює:

$$\eta = \psi + \gamma \quad (2.4)$$



а – профіль канавки зуба пили; б – схема повороту профілю канавки зуба в вихідне положення.

Рисунок 2.2 – Схема повороту відрізної пили навколо її осі на кут η для формоутворення передньої поверхні під кутом γ

Введемо систему координат XYZ , пов'язану з відрізною пилою. Направимо вісь Z по осі пили, вісь Y – по лінії, що з'єднує два центра: пили та дискової обкатної фрези. Відрізок "b", що відсікає передня площина від осі Y (рис.2.2.б) дорівнює:

$$b = \frac{0.5 \cdot D \cdot \sin \gamma}{\sin \psi} \quad (2.5)$$

В системі XYZ рівняння передньої площини, профіль якої $A_i B_i$, буде:

$$Y = X \cdot \operatorname{ctg} \psi - b = X \cdot \operatorname{ctg} \psi - \frac{0.5 \cdot D \cdot \sin \gamma}{\sin \psi} \quad (2.6)$$

З дисковою обкатною фрезою пов'яжемо систему координат $X_\phi Y_\phi Z_\phi$ (рис. 2.3). Вісь X_ϕ збігається з віссю обертання інструменту. Вісь Y_ϕ

збігається з віссю Y , вісь Z_ϕ йде паралельно осі Z . Відстань між системами координат (міжосьова відстань) позначено через a .

Формули перетворення координат у цьому випадку запишуться:

$$X_\phi = X, \quad (2.7)$$

$$Y_\phi = Y - a, \quad (2.8)$$

$$Z_\phi = Z. \quad (2.9)$$

Характеристику на передній площині пили будемо визначати ґрунтуючись на наступному положенні: у точках характеристики вектор швидкості руху передньої площини відносно інструмента лежить у передній площині [74,58].

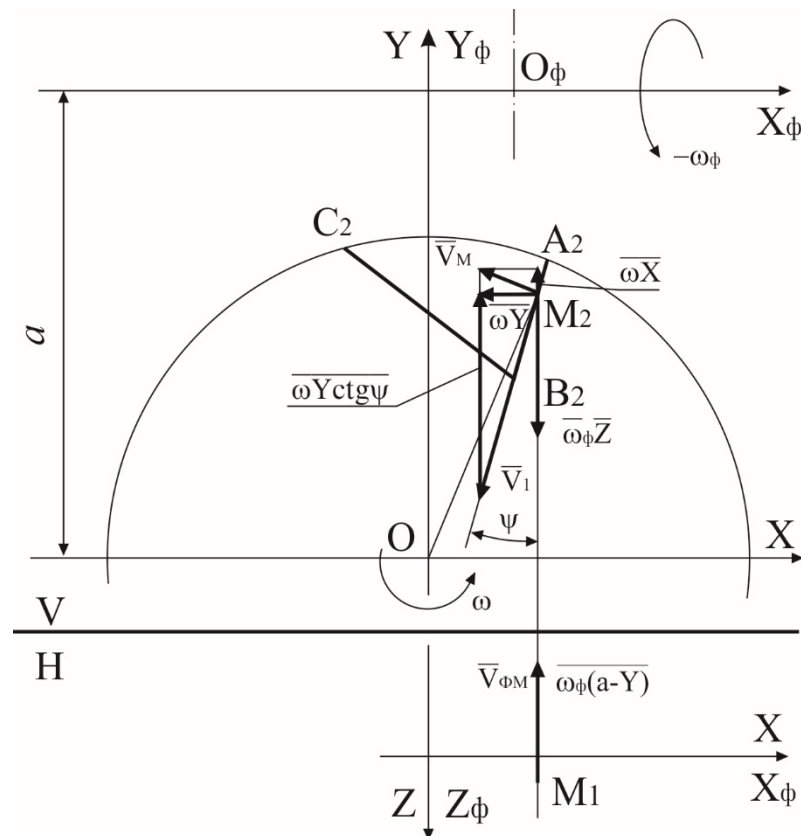


Рисунок 2.3 - Визначення характеристики на передній площині пили

При обробці пила обертається навколо своєї осі з кутовою швидкістю:

$$\bar{\omega} = \bar{k} \cdot \omega$$

На передній площині пили розглянемо довільну точку M контакту пили і фрези. Швидкість точки M при обертанні з кутовою швидкістю $\bar{\omega} = \bar{k} \cdot \omega$ буде:

$$\bar{V}_M = \bar{i} \cdot (-\omega \cdot Y) + \bar{j} \cdot \omega \cdot X$$

Інструмент обертається навколо своєї осі з кутовою швидкістю ω_ϕ . Для того, щоб розглянути відносний рух передньої площини, всій системі надаємо рух з кутовою швидкістю $-\omega_\phi$.

Тоді в результаті обертання з кутовою швидкістю ω_ϕ швидкість точки M інструменту буде дорівнювати:

$$\bar{V}_{\phi M} = -\bar{j} \cdot \omega_\phi \cdot Z - \bar{k} \cdot \omega_\phi \cdot (a - Y)$$

Складова швидкості $-\bar{k} \cdot \omega_\phi \cdot (a - Y)$ лежить у передній площині зуба пили для будь-якої її точки.

Для виконання другої умови формоутворення необхідно, щоб в усіх точках характеристики сумарний вектор швидкості лежав у передній площині:

$$\bar{V}_\Sigma = \bar{i} \cdot (-\omega \cdot Y) + \bar{j} \cdot \omega \cdot X - \bar{j} \cdot \omega_\phi \cdot Z$$

Вектор $\bar{i} \cdot (-\omega \cdot Y)$ розкладемо на два вектори

$$\bar{i} \cdot (-\omega \cdot Y) = \bar{V}_1 + \bar{j} \cdot (\omega \cdot Y \cdot \operatorname{ctg} \psi)$$

Вектор \bar{V}_1 - лежить у передній площині. Для того щоб швидкість \bar{V}_Σ відносного руху розташовувалася в передній площині необхідно, щоб проекція швидкості на вісь Y в даному випадку дорівнювала 0.

Отже рівняння передньої площини буде:

$$\omega \cdot X + \omega \cdot Y \cdot \operatorname{ctg} \psi = \omega_\phi \cdot Z \quad (2.10)$$

Звідси рівняння контакту:

$$Z = \frac{\omega}{\omega_\phi} \cdot (X + Y \cdot \operatorname{ctg} \psi) \quad (2.11)$$

У відповідності з рівнянням передньої площини (2.6) розраховується координата Y . По рівнянню контакту (2.11) визначається координата Z .

Так як характеристика в розглянутому випадку є прямою лінією достатньо розрахувати координати двох точок, наприклад, точки A_i і точки B_i .

Координати XU точки A_i не змінюються для кожного профілю зуба у групі, та розраховуються за наступними залежностями:

$$X_A = 0,5 \cdot D \cdot \sin(\psi + \gamma), \quad (2.12)$$

$$Y_A = 0,5 \cdot D \cdot \cos(\psi + \gamma). \quad (2.13)$$

Координати точки B_i змінюються для кожного профілю зуба у групі, так як змінюються кутові кроки в групі, та розраховуються за наступними залежностями:

$$X_{Bi} = X_A - H_i \cdot \sin \psi,$$

$$Y_{Bi} = Y_A - H_i \cdot \cos \psi.$$

Або з урахуванням (2.12) та (2.13):

$$X_{Bi} = 0,5 \cdot D \cdot \sin(\psi + \gamma) - H_i \cdot \sin \psi, \quad (2.14)$$

$$Y_{Bi} = 0,5 \cdot D \cdot \cos(\psi + \gamma) - H_i \cdot \cos \psi. \quad (2.15)$$

Координата Z точок A_i і B_i характеристики, визначається за рівнянням контакту (2.11).

Знаючи координати характеристики в системі XYZ за формулами перетворення координат (2.7–2.9) визначаються координати точок характеристики в системі $X_\phi Y_\phi Z_\phi$, яку приймаємо за різальну кромку інструменту.

Координати точки характеристики, що відповідають точці C_i профілю виробу змінюються для кожного профілю зуба у групі та розраховуються в такій послідовності (рис. 2.4). Координати X , Y точки C_i :

$$X_{Ci} = 0,5 \cdot D \cdot \sin(\psi + \gamma - \varepsilon_i), \quad (2.16)$$

$$Y_{Ci} = 0,5 \cdot D \cdot \cos(\psi + \gamma - \varepsilon_i). \quad (2.17)$$

де ε_i - кутовий крок кожного зуба у групі відрізної пили.

Координата Z точки C характеристики, визначається за рівнянням контакту:

$$Z_{Ci} = \frac{\omega}{\omega_\phi} \cdot (X_{Ci} + Y_{Ci} \cdot \operatorname{ctg}(\theta - \psi)) \quad (2.18)$$

Координати точки C_i характеристики в системі $X_\phi Y_\phi Z_\phi$ визначаються за формулами перетворення координат (2.7–2.9).

Три точки A_i , B_i і C_i характеристик визначають положення проекції передньої площини дискової обкатної фрези.

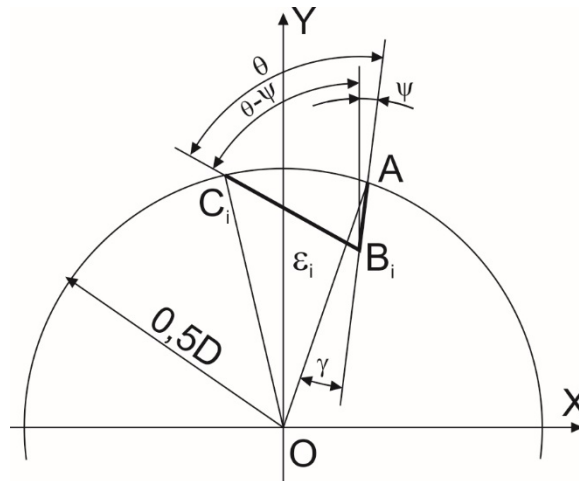


Рисунок 2.4 – Схема для розрахунку координат точки С

Визначимо глибини стружкових канавок по передній поверхні H_i кожного зуба в групі. Найбільший крок в групі ε_{\max} відповідає зубу з найбільшою глибиною канавки H_{\max} , профіль якої ABC (рис.2.5, а) [45].

В системі XU запишемо координати точки A і C :

$$X_A = 0; Y_A = \frac{D}{2}$$

$$X_C = -\frac{D}{2} \cdot \sin \varepsilon_{\max}; Y_C = \frac{D}{2} \cdot \cos \varepsilon_{\max}$$

Рівняння прямої AB :

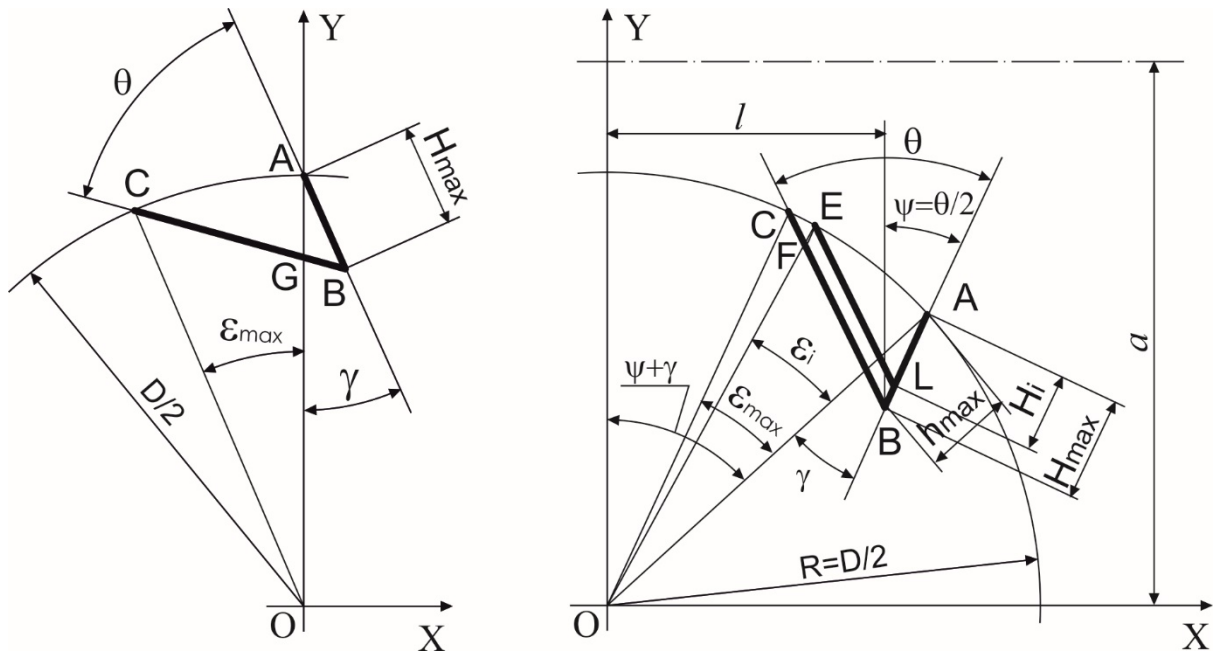
$$Y = \frac{D}{2} - X \cdot \operatorname{ctg} \gamma$$

Запишемо координаті точки G :

$$X_G = 0; Y_G = Y_C - \frac{D}{2} \cdot \sin \varepsilon_{\max} \cdot \operatorname{ctg}(\psi + \gamma)$$

Рівняння прямої CG :

$$Y = Y_G - X \cdot \operatorname{ctg}(\psi + \gamma)$$



а – визначення H_{max} ; б - визначення H_i та h_i .

Рисунок 2.5 – Схема для визначення глибин канавок зубів відрізної пили

Спільне рішення рівнянь прямих AB і CG визначає координати точки B :

$$X_B = \frac{\frac{D}{2} - Y_G}{\operatorname{ctg} \gamma - \operatorname{ctg}(\psi + \gamma)}$$

$$Y_B = \frac{D}{2} - \frac{\left(\frac{D}{2} - Y_G\right) \cdot \operatorname{ctg} \gamma}{\operatorname{ctg} \gamma - \operatorname{ctg}(\psi + \gamma)} = \frac{Y_G \cdot \operatorname{ctg} \gamma - \frac{D}{2} \cdot \operatorname{ctg}(\psi + \gamma)}{\operatorname{ctg} \gamma - \operatorname{ctg}(\psi + \gamma)}$$

Глибина H_{max} стружкової канавки дорівнює:

$$H_{max} = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_A - Y_B)^2} \quad (2.19)$$

Підставляючи у вираз (2.19) координати точок A і B та перетворюючи його, одержимо:

$$H_{max} = \frac{\frac{D}{2} - Y_G}{\sin \gamma [\operatorname{ctg} \gamma - \operatorname{ctg}(\psi + \gamma)]} \quad (2.20)$$

Визначимо глибину канавки зуба пили, профіль якої ALE (рис.2.5, б) та кутовий крок ε_i .

З побудови:

$$CE = R \cdot (\varepsilon_{max} - \varepsilon_i) = R \cdot \Delta \varepsilon$$

Приймемо кут $ECO=90^\circ$. Пряма EF паралельна AB . Тоді з трикутника CEF кут $EFC=\theta$, кут $ECF=90-(\gamma-\varepsilon_{\max})$.

Можемо записати:

$$\frac{CE}{\sin \theta} = \frac{EF}{\cos(\gamma - \varepsilon_{\max})}$$

Або

$$EF = \frac{CE \cdot \cos(\gamma - \varepsilon_{\max})}{\sin \theta} = \frac{R \cdot \cos(\gamma - \varepsilon_{\max})}{\sin \theta}$$

З побудови $EF=LB=H_{\max}-H_i$

Таким чином при відомій величині H_{\max} та кутових кроках ε_{\max} і ε_i глибина стружкової канавки по передній поверхні H_i на суміжному зубі дорівнює:

$$H_i = H_{\max} - \frac{R \cdot \cos(\gamma - \varepsilon_{\max}) \cdot (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_i)}{\sin \theta} \quad (2.21)$$

Відповідно до рівняння (2.20) розраховуються глибини канавок кожного зуба в групі відрізної пили.

Глибина h_i (рис.2.5) для кожного зуба відрізної пили з прямолінійними ріжучими кромками визначається за залежністю:

$$h_i = \frac{0.5 \cdot D \cdot [1 - \cos \varepsilon_i + \sin \varepsilon_i \cdot \operatorname{ctg}(\psi + \gamma)]}{1 - \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{ctg}(\psi + \gamma)} \quad (2.22)$$

Зміщення осі обкатної фрези до осі відрізної пили характеризується розміром « l » і відстанню « a » між їх осями, які визначаються для найбільшого зуба обкатної фрези за залежностями (рис.2.5):

$$l = 0.5 \cdot D \cdot \sin(\psi + \gamma) - H_{\max} \cdot \sin \psi \quad (2.23)$$

$$a = 0.5 \cdot D \cdot \sin(90^\circ - (\psi + \gamma) + 0.5 \cdot \varepsilon_{\max}) - h_{\max} + R_{\phi} \quad (2.24)$$

Обробка відрізних пил на зубофрезерному верстаті можлива також при нахиленій установці осі обкатної фрези до осі пили. Нарізування зубів відрізних пил прямолінійного профілю при нахиленій осі інструменту відносно осі пили є найбільш загальним випадком формоутворенням.

Визначимо координати точок прямолінійних різальних кромки дискової обкатної фрези при нахиліній установці її осі до осі пили.

2.2.2 Координати точок різальних кромки дискової обкатної фрези при нахиліній установці осі інструменту відносно осі відрізної пили

В якості різальної кромки дискової обкатної фрези при нахиліній установці її осі до осі пили приймемо характеристику, яку треба визначити в той момент часу, коли передня поверхня займає положення, відповідне вибраному значенню кута ψ . З оброблюваною пилою пов'яжемо систему координат XYZ (рис.2.6). Направимо вісь Z вздовж осі пили, вісь Y - за лінією, що з'єднує два центри: пили та дискової обкатної фрези. Осі X і Y розташовуються в площині перпендикулярній осі пили.

З обкатною фрезою, що проектується, пов'яжемо систему координат $X_\phi Y_\phi Z_\phi$. Вісь Y_ϕ збігається з віссю Y , вісь X_ϕ співпадає з віссю інструмента, який обертається з кутовою швидкістю $-\bar{\omega}_\phi$. Формули перетворення координат у цьому випадку записуються таким чином:

$$X_\phi = X \cdot \cos \beta - Z \cdot \sin \beta, \quad (2.25)$$

$$Y_\phi = Y - a, \quad (2.26)$$

$$Z_\phi = Z \cdot \cos \beta + X \cdot \sin \beta. \quad (2.27)$$

де β - кут нахилу осі фрези.

Визначимо характеристику на поверхні відрізної пили в той момент часу, коли її передня площина займає положення зображене на рисунку 2.6. Тоді рівняння передньої площини оброблюваної пили в системі XYZ буде:

$$Y = X \cdot \operatorname{ctg} \psi - \frac{0,5 \cdot D \cdot \sin \gamma}{\sin \psi} \quad (2.28)$$

На плоскій передній поверхні розглянемо довільну точку $M(X, Y, Z)$. Швидкість точки M при обертанні навколо осі оброблюваної пили з кутовою швидкістю $\bar{\omega} = \bar{k} \cdot \omega$ буде:

$$\bar{V}_M = [\bar{\omega} \times \bar{r}_M]$$

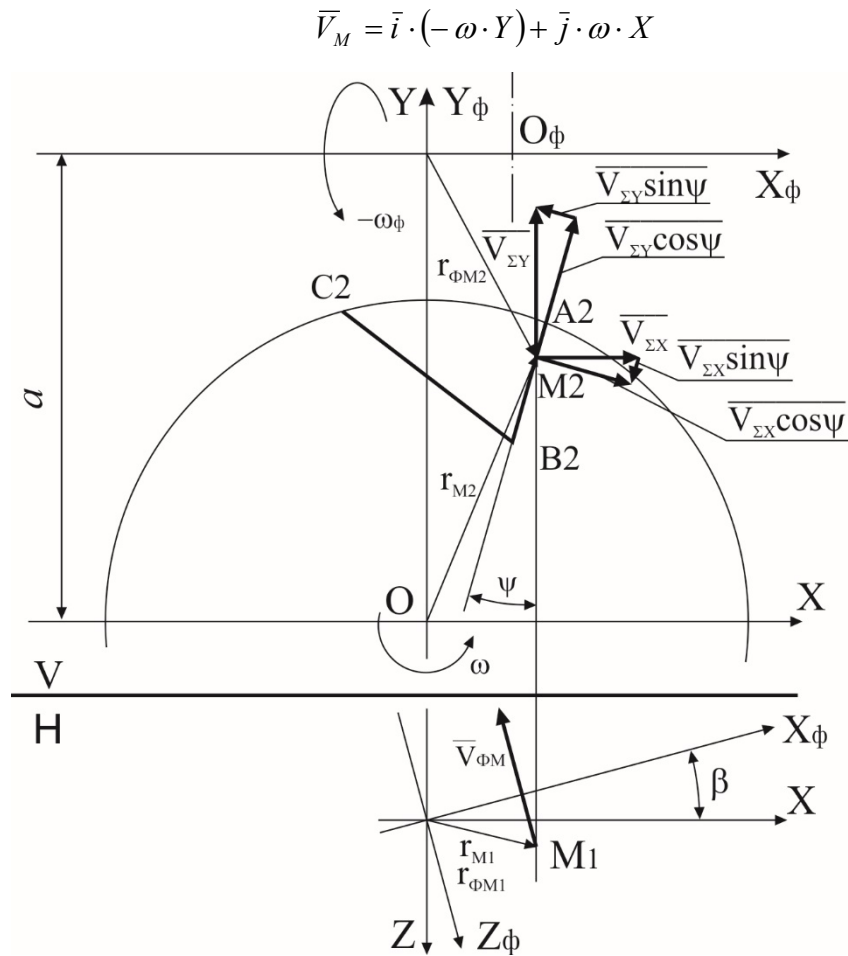


Рисунок 2.6 – Схема для визначення координат точок різальних кромок дискової обкатної фрези при нахиленої осі інструменту відносно осі пили

Аналізуючи відносний рух інструменту і відрізної пили необхідно враховувати, що точка М бере участь також у русі обертання інструменту навколо його осі. В результаті обертання з кутовою швидкістю $\bar{\omega}_\phi$ навколо осі X_ϕ швидкість точки $M(X \cdot \cos \beta, Y - a, Z \cdot \sin \beta)$ в системі $X_\phi Y_\phi Z_\phi$ буде дорівнювати:

$$\bar{V}_{\phi M} = [\bar{\omega}_\phi \times \bar{r}_{\phi M}]$$

В системі XYZ маємо:

$$\bar{\omega}_\phi = \bar{i} \cdot \omega_\phi \cdot \cos \beta - \bar{k} \cdot \omega_\phi \cdot \sin \beta,$$

$$\bar{r}_{\phi M} = \bar{i} \cdot X + \bar{j} \cdot (Y - a) + \bar{k} \cdot Z.$$

Таким чином швидкість $\bar{V}_{\phi M}$ довільної точки М передньої площини зуба пили при обертанні навколо осі інструменту буде:

$$\bar{V}_{M1} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \omega_\phi \cdot \cos \beta & 0 & -\omega_\phi \cdot \sin \beta \\ X & Y - a & Z \end{vmatrix}$$

Розкриваючи визначник, отримаємо:

$$\bar{V}_{M1} = \bar{i} \cdot [\omega_\phi \cdot \sin \beta \cdot (Y - a)] - \bar{j} \cdot (Z \cdot \omega_\phi \cdot \cos \beta + X \cdot \omega_\phi \cdot \sin \beta) + \bar{k} \cdot [\omega_\phi \cdot \cos \beta \cdot (Y - a)]$$

Складова швидкості $\bar{k} \cdot [\omega_\phi \cdot \cos \beta \cdot (Y - a)]$ лежить у передній площині для будь-якої її точки. Тому при визначенні характеристики її можна не враховувати. Таким чином в точках характеристики необхідно, щоб наступний сумарний вектор \bar{V}_Σ лежав у передній площині [58,74].

$$\bar{V}_\Sigma = \bar{i} \cdot [\omega_\phi \cdot \sin \beta \cdot (Y - a) - \omega \cdot Y] + \bar{j} \cdot [\omega \cdot X - \omega_\phi \cdot Z \cdot \cos \beta - \omega_\phi \cdot X \cdot \sin \beta], \quad (2.29)$$

$$\bar{V}_\Sigma = \bar{i} \cdot V_{\Sigma X} + \bar{j} \cdot V_{\Sigma Y}.$$

Кожен з розглянутих проекцій векторів $\bar{V}_{\Sigma X}$ і $\bar{V}_{\Sigma Y}$ розкладемо на два напрямки - на нормаль до передньої поверхні і на напрямок, що знаходиться в ній. Складові розглянутих векторів, що лежать в передній площині, можна при визначенні характеристики не враховувати. Сума складових векторів на нормаль до передньої поверхні в точках характеристики повинна дорівнювати нулю. У цьому випадку вектори швидкостей точок характеристики при їх відносному русі будуть лежати в передній площині.

Таким чином будемо мати:

$$V_{\Sigma X} \cdot \cos \psi = V_{\Sigma Y} \cdot \sin \psi$$

або

$$[\omega_\phi \cdot \sin \beta \cdot (Y - a) - \omega \cdot Y] \cdot \cos \psi = [\omega \cdot X - \omega_\phi \cdot Z \cdot \cos \beta - \omega_\phi \cdot X \cdot \sin \beta] \cdot \sin \psi$$

Визначаючи звідси координату Z, отримуємо:

$$Z = \frac{\omega}{\omega_\phi} \cdot \frac{(X + Y \cdot \operatorname{ctg} \psi)}{\cos \beta} - \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{ctg} \psi \cdot (Y - a) - X \cdot \operatorname{tg} \beta \quad (2.30)$$

При $\beta=0$ отримуємо раніше виведену, при безпосередньому аналізі цього випадку, формулу (2.11).

Знаючи різальну кромку $A_i B_i$ створюємо на ній рекомендовані величини передніх кутів γ і таким чином визначаємо положення передньої

поверхні. Так як при обробці потиличної плоскої поверхні вимоги високої точності відсутні, різальну кромку, яка обробляє потиличну площину, проводять через точку B_i і проекцію точки C_i на передню площину.

Поряд з визначенням форми різальних кромок постає задача забезпечення виготовлення відрізних пил дискової обкатною фрезою без проникнення різальної кромки в тіло деталі. Для отримання прямолінійного профіля відрізною пили прямолінійними різальними кромками обкатної фрези необхідно визначити її мінімальний діаметр, при якому не буде проникнення різальних кромок в тіло заготовки в процесі обробки. [58,69,74].

2.3 Визначення розрахункового мінімального допустимого діаметра дискової обкатної фрези

Визначимо радіус дискової обкатної фрези і її положення щодо пили з нерівномірним кроком зубів. Для спрощення, а також якщо врахувати той факт, що вісь дискової обкатної фрези нахилена до осі відрізної пили небезпека проникнення різальної кромки дискової обкатної фрези в тіло деталі зменшується, розглянемо випадок коли вісь обкатної фрези встановлена перпендикулярно до осі пили [49].

Розглянемо випадок, коли вершинна точка зуба обкатної фрези знаходиться в точці K западини профіля зуба пили. При цьому положення профілю відрізної пили характеризується кутом повороту $\psi + \gamma$, що забезпечує оброблення профілю в відповідності до креслення [58,74].

Вважаємо, точка K різальної кромки дискової обкатної фрези розташовується в перерізі I - I (рис.2.7), положення якого вибрано таким чином, щоб отримати певну величину кута ψ . В перерізі I - I при обертанні фрези навколо її осі буде переміщатися вершинна різальна кромка зуба, оскільки осі фрези і пили взаємо-перпендикулярні і при обробці дисковими обкатними фрезами спостерігається обертання фрези і відрізної пили навколо своїх осей [50].

За вихідний переріз пили приймемо переріз перпендикулярний до її осі, в якому вершинна точка ріжучої кромки K обкатної фрези знаходиться в точці B западини профілю оброблюваної пили. Дотик різальної кромки зуба обкатної фрези, що обробляє передню поверхню пили, з її зовнішнім колом, позначимо точкою G , положення якої визначається кутами η_1 і η_2 .

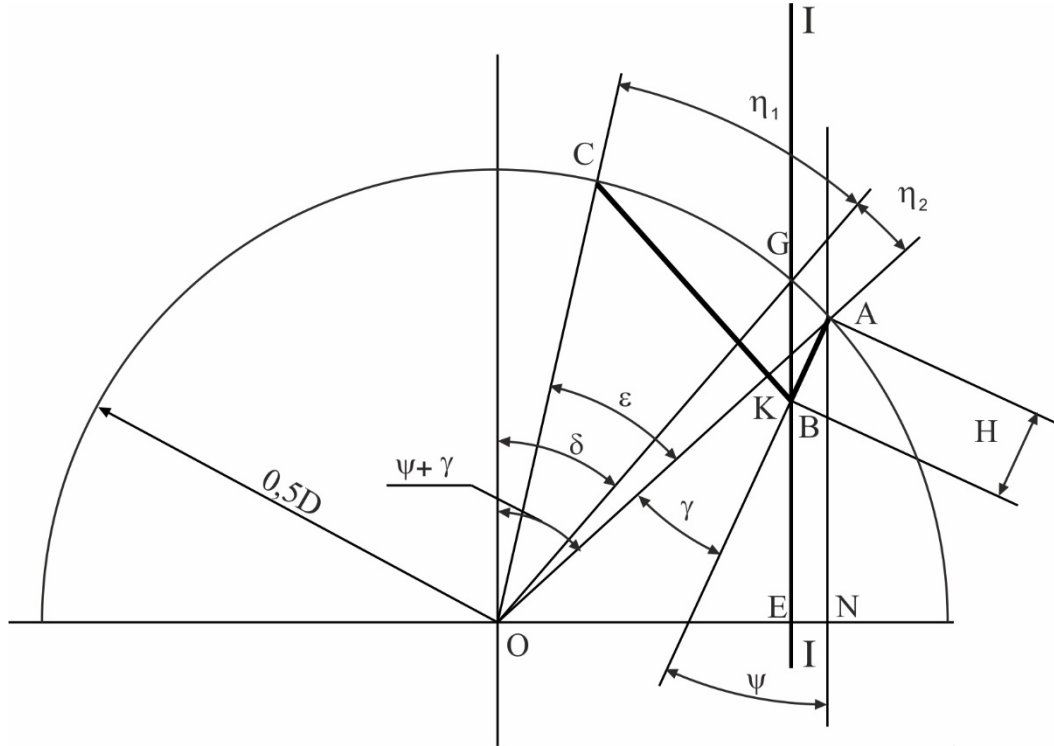


Рисунок 2.7 – Схема визначення кутів η_1 і η_2 , коли вершинна точка зуба обкатної фрези K знаходиться в точці B западини профілю пили, та кути $\eta_1 \neq \eta_2$

Кут η_2 дорівнює:

$$\eta_2 = \psi + \gamma - \delta, \quad (2.31)$$

Визначимо кут δ (рис. 2.7). З побудови маємо:

$$ON = 0.5 \cdot D \cdot \sin(\psi + \gamma),$$

$$EN = H \cdot \sin \psi,$$

$$OE = ON - EN = 0.5 \cdot D \cdot \sin(\psi + \gamma) - H \cdot \sin \psi,$$

Тоді:

$$\sin \delta = \frac{OE}{0.5 \cdot D} = \sin(\psi + \gamma) - \frac{H}{0.5 \cdot D} \cdot \sin \psi \quad (2.32)$$

Кут η_2 дорівнює:

$$\eta_1 = \varepsilon - \eta_2. \quad (2.33)$$

З досліджень [73,75,78,79], та з точки зору технології виготовлення, доцільно проектувати дискову обкатну фрезу з симетричним профілем. Тому практичний інтерес являє собою випадок, коли кути η_1 і η_2 дорівнюють один одному.

В цьому випадку величина кута ψ приймає цілком певне значення. Визначення глибини h_l , коли кут $\eta_1 = \eta_2 = \eta$ наведено на рис. 2.8.

Зображений профіль АВС пили. Кут ε розділено на дві рівні частини, і таким чином визначено положення точки G на зовнішньому колі виробу. Проведена лінія GK, яка з одного боку обмежує кут ψ . Іншою стороною, що обмежує ψ кут буде пряма АВ. Профіль АВС повертається у вихідне положення на кут $(\psi + \gamma)$. Вихідне положення профілю зображено пунктиром.

З побудови маємо:

$$\begin{aligned} GF &= 0.5 \cdot D \cdot \sin \eta, \\ MF &= BL = H \cdot \sin \gamma, \\ GM &= GF + MF = 0.5 \cdot D \cdot \sin \eta + H \cdot \sin \gamma, \\ OF &= 0.5 \cdot D \cdot \cos \eta, \\ AF &= 0.5 \cdot D - OF = 0.5 \cdot D \cdot (1 - \cos \eta), \\ AL &= H \cdot \cos \gamma, \\ LF &= AL - AF = H \cdot \cos \gamma - 0.5 \cdot D \cdot (1 - \cos \eta), \\ \angle GBM &= \psi + \gamma, \\ tg(\psi + \gamma) &= \frac{GM}{MB}, \\ tg(\psi + \gamma) &= \frac{0.5 \cdot D \cdot \sin \eta + H \cdot \sin \gamma}{H \cdot \cos \gamma - 0.5 \cdot D \cdot (1 - \cos \eta)} \end{aligned} \quad (2.34)$$

У цьому випадку розмір GB дорівнює:

$$GB = \frac{GM}{\sin(\psi + \gamma)}$$

або

$$h_1 = GB = \frac{0.5 \cdot D \cdot \sin \eta + H \cdot \sin \gamma}{\sin(\psi + \gamma)} \quad (2.35)$$

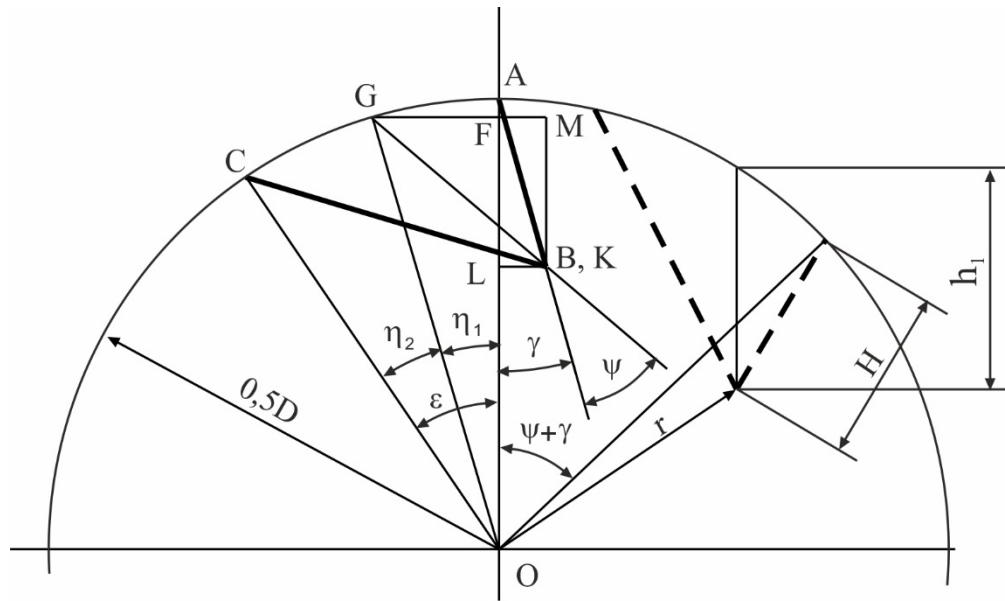


Рисунок 2.8 – Схема визначення кутів η_1 і η_2 та глибини h_1 , коли вершинна точка зуба обкатної фрези К знаходиться в точці В западині профілю відрізної пили, та кути $\eta_1 = \eta_2 = \eta$

При відомих величинах кутів η_1 і η_2 , визначення радіуса R_0 дискової обкатної фрези наведено на рис.2.9 [69].

Площина проєкцій V обрана перпендикулярно осі фрези, а площину W - перпендикулярно осі пили.

У вихідному перерізі II - II зображений профіль пили ABC (його проєкції позначені $A_3B_3C_3$ і $A_2B_2C_2$). В процесі обробки фреза обертається навколо своєї осі з кутовою швидкістю $\bar{\omega}_\phi$, а пила обертається навколо своєї осі з кутовою швидкістю $\bar{\omega}$. За час повороту дискової обкатної фрези на один зуб, пила також повертається на один зуб.

Отже, можемо записати:

$$\frac{\rho_\phi}{\rho} = \frac{Z}{Z_0}$$

де ρ_ϕ - кут повороту фрези;

ρ - відповідний кут повороту оброблюваної пили.

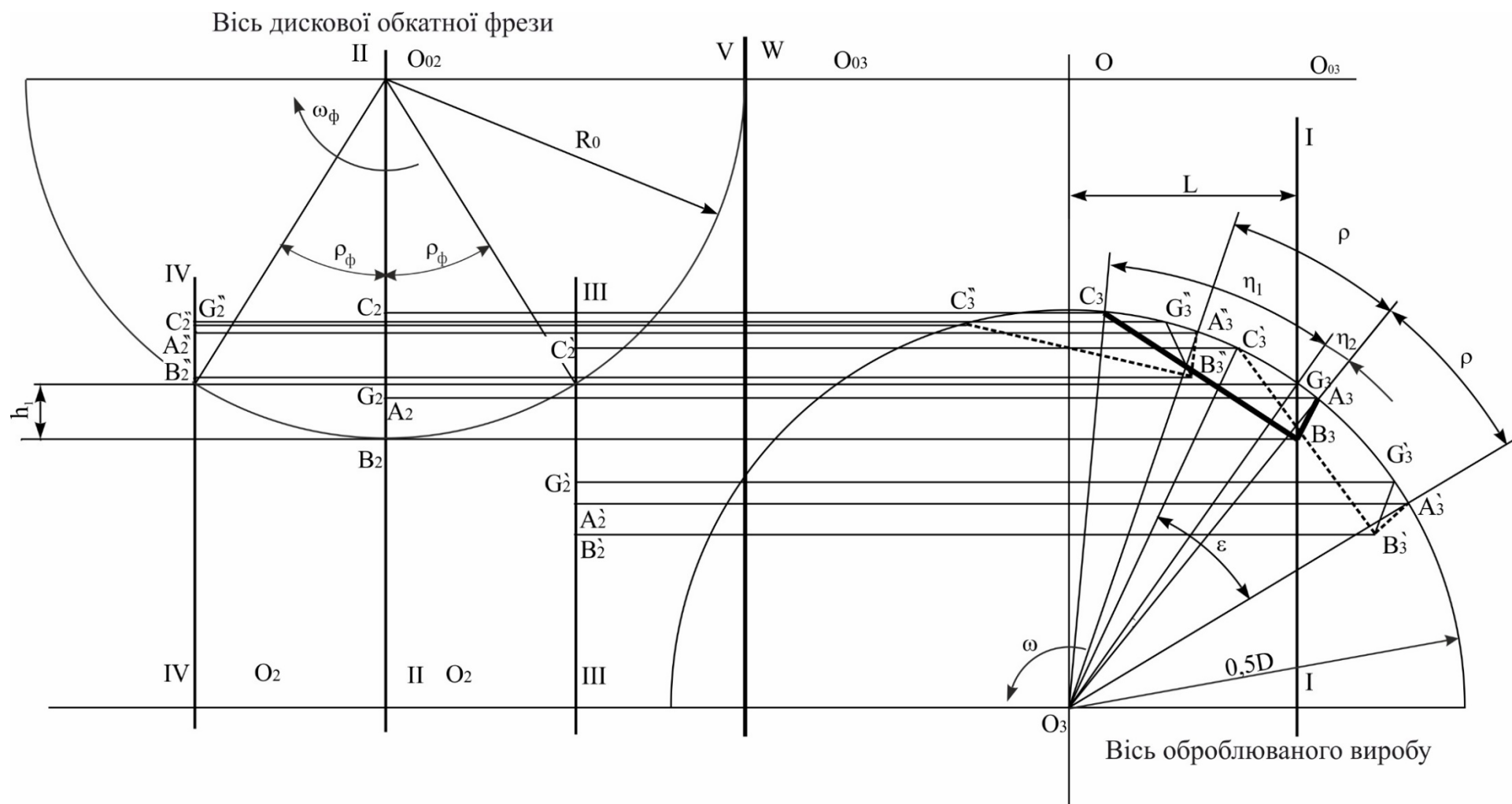


Рисунок 2.9 - Визначення допустимого зовнішнього радіуса R_0 дискової обкатної фрези

Вершинна точка різальної кромки обкатної фрези, обертаючись навколо осі, описує в перерізі I - I коло радіуса R_0 , яка в справжню величину проектується на площину V. Цей профіль ABC повертаємо за годинниковою стрілкою на кут ρ навколо осі пили і отримуємо профіль її зуба $A^I B^I C^I$ (його проекції позначені $A^I_3 B^I_3 C^I_3$ і $A^I_2 B^I_2 C^I_2$) в перерізі III - III. Точка G розташовується, як видно з креслення, всередині профілю $A^I B^I C^I$. Тому в момент врізування не буде проникнення розглянутої точки різальної кромки в тіло виробу і друга умова формоутворення буде дотримуватися.

Граничний випадок буде тоді, коли точка G_3 збігається з точкою C^I_3 . В цьому випадку кут ρ повороту зуба пили при переході від перерізу II - II до перерізу III - III буде дорівнює:

$$\rho = \eta_1$$

Тому, для того, щоб в цій зоні дотримувалася друга умова формоутворення, кут ρ повинен бути менше η_1 , або дорівнює йому.

$$\eta_1 \geq \rho$$

Для того, щоб одержати профіль зуба у другому крайньому перерізі IV - IV повернемо профіль ABC проти годинникової стрілки на кут ρ . Профіль зуба пили в перерізі IV - IV буде $A^{II} B^{II} C^{II}$ (його проекції позначені $A^{II}_3 B^{II}_3 C^{II}_3$ і $A^{II}_2 B^{II}_2 C^{II}_2$). Як видно з креслення, у цьому випадку точка G лежить за межами профілю $A^{II} B^{II} C^{II}$. Тому, в момент виходу з процесу різання крайня вершинна точка різальної кромки дискової обкатної фрези буде проникати в тіло зуба пили і обробка заданого профілю у відповідності з кресленням виявляється неможливою. В цьому випадку не виконується друга умова формоутворення. Граничний випадок буде тоді, коли точка G буде збігатися з точкою A^{II} , тоді кут повороту ρ профілю зуба пили при переході від перетину II - II до перетину IV - IV повинен бути:

$$\rho = \eta_2$$

Отже, для того, щоб у момент виходу з контакту з зубом пили дотримувалась друга умова формоутворення, необхідно, щоб кут ρ був менший або дорівнює η_2 .

$$\eta_2 \geq \rho$$

Таким чином маємо:

$$\eta_1 \geq \rho,$$

$$\eta_2 \geq \rho,$$

$$\varepsilon = \eta_1 + \eta_2.$$

Виходячи з цього доцільно приймати кут $\eta_1 = \eta_2$.

Розрахункове мінімальне значення зовнішнього радіуса $R_{0\min}$ фрези визначається за формулою:

$$\cos \rho_\phi = \frac{R_{0\min} - h_1}{R_{0\min}}$$

звідси

$$R_{0\min} = \frac{h_1}{1 - \cos \rho_\phi} \quad (2.36)$$

де

$$\rho_\phi = \rho \frac{Z}{Z_0} \quad (2.37)$$

Таким чином з точки зору другої умови формоутворення, найбільша небезпека проникнення різальної кромки дискової обкатної фрези в тіло зуба пили має місце в вершинній точці різальної кромки. Аналіз показує, що найбільш часто це положення дотримується. Якщо виникає необхідність у перевірці дотримання другої умови формоутворення для інших точок різальної кромки, то методика розв'язання цієї задачі може бути прийнята тією ж самою, що і для вершинної точки різальної кромки.

У загальному випадку вісь дискової обкатної фрези встановлюється нахилено відносно осі пили. Але і в цьому випадку можна скористатися розробленою методикою визначення радіуса $R_{0\min}$ дискової обкатної фрези.

Це пояснюється тим, що при нахиленій установці обкатної фрези небезпека проникнення різальної кромки фрези в тіло зуба зменшується.

Третя умова формоутворення - це умова не перетинання суміжних ділянок вихідної інструментальної поверхні [58,74].

Оброблені поверхні виробів складаються з ряду суміжних ділянок. Сполучена вихідна інструментальна поверхня також складається з сукупності суміжних поверхонь, що стикаються з різними ділянками поверхні зуба пили. Різні ділянки інструментальної поверхні можуть займати різноманітні положення відносно один одного [58,74].

Якщо спостерігається перетин суміжних ділянок інструментальної поверхні, здійснити їх повністю в металі неможливо. Тому ті ділянки профілю виробу, які відповідають нездійсненим в металі ділянкам вихідної поверхні, не будуть оброблені. В результаті в межах дотичних ділянок утворюється перехідна поверхня. Якщо суміжні ділянки вихідної поверхні стикаються один з одним або відстоять один від одного на певній відстані, в металі можна здійснити всі ділянки вихідної інструментальної поверхні. В цьому випадку поверхня виробу обробляється в точній відповідності з кресленням без перехідних кривих на кордонах ділянок [58,74].

Відомо, що перетин суміжних ділянок ВІП і утворення перехідних поверхонь спостерігається при обробці за способом обкочування западин на деталях.

При обробці обкатними фрезами зубів пили з прямолінійним профілем оброблюваних канавок при установці осі дискової обкатної фрези перпендикулярно до осі виробу не витримується третя умова формоутворення. Суміжні ділянки вихідної інструментальної поверхні, пов'язані із суміжними ділянками оброблюваної канавки, перетинають один одного, і в западині зуба створюються перехідні поверхні. Це пояснюється тим, що на межі суміжних ділянок поверхні зуба спостерігається розрив характеристик, так як на прямій перетину суміжних ділянок поверхні зуба

немає точки, в якій швидкість відносного руху дотикалась би лінії перетину суміжних ділянок [58,74].

Обробити суміжні плоскі ділянки поверхні канавок зуба пили без перехідних кривих в западині зуба можна, використовуючи нахилену установку осі фрези по відношенню до осі оброблюваної канавки [44,48].

При цьому кут нахилу осі фрези повинен мати певну величину, яка залежить від розмірів оброблюваної канавки і кінематики процесу.

Розглянемо визначення кута нахилу осі та координат точок прямолінійної різальної кромки дискової обкатної фрези, що забезпечує обробку прямозубих стружкових канавок без перехідних кривих [58,74].

2.4 Проектування дискових обкатних фрез, що забезпечують виготовлення стружкових канавок без перехідних кривих

У загальному випадку при обробці зубів пил з прямолінійним профілем при установці осі дискової обкатної фрези перпендикулярно до осі пили, спостерігається у западині поява перехідних поверхонь [44,48,49,58,74]. Як відомо, обробка без перехідних поверхонь у западині зубів пил буде в тому випадку, якщо суміжні ділянки вихідної інструментальної поверхні не перетинають один одного і на межі ділянок, характеристики не мають розриву і стикаються одна з одною. Для цього необхідно, щоб в одній з точок на межі суміжних ділянок поверхні зуба швидкість руху \vec{V} кожній точці його поверхні щодо інструменту торкалася лінії перетину суміжних ділянок поверхні зуба [59,74].

Межею ділянок при обробці зубів пил прямолінійного профілю буде твірна, якій належить точка B_i (рис.2.6). Координати цієї точки будуть змінюватися для кожного профілю зуба у групі, та розраховуються за залежностями 2.14 та 2.15.

Швидкість відносного руху довільної точки твірної, що проходить через точку В буде дорівнювати (рис.2.6):

$$\begin{aligned}\bar{V} = & \bar{i} \cdot [\omega_\phi \cdot \sin \beta \cdot (Y_{Bi} - a) - \omega \cdot Y_{Bi}] - \bar{j} \cdot [\omega_\phi \cdot Z_{Bi} \cdot \cos \beta + \omega_\phi \cdot X_{Bi} \cdot \sin \beta - \omega \cdot X] + \\ & + \bar{k} \cdot [\omega_\phi \cdot \cos \beta \cdot (Y_{Bi} - a)]\end{aligned}$$

Для того щоб не було перехідної кривої в западині зуба швидкість \bar{V} повинна йти вздовж твірної, що відповідає точці B_i , і бути паралельною осі Z . Проекція швидкості на осі X і Y повинна дорівнювати нулю. Отже:

$$\begin{cases} \omega_\phi \cdot \sin \beta \cdot (Y_{Bi} - a) - \omega \cdot Y_{Bi} = 0 \\ \omega_\phi \cdot Z_{Bi} \cdot \cos \beta + \omega_\phi \cdot X_{Bi} \cdot \sin \beta - \omega \cdot X_{Bi} = 0 \end{cases} \quad (2.38)$$

З першого рівняння системи рівнянь (2.38) визначаємо кут нахилу осі обкатної фрези до осі виробу:

$$\sin \beta = \frac{\omega \cdot Y_{Bi}}{\omega_\phi \cdot (Y_{Bi} - a)} \quad (2.39)$$

З другого рівняння системи рівнянь (2.38) визначаємо координату Z точки B :

$$Z_{Bi} = \frac{\omega \cdot X_{Bi} - \omega_\phi \cdot X_{Bi} \cdot \sin \beta}{\omega_\phi \cdot \cos \beta}$$

або

$$Z_{Bi} = \frac{X_{Bi} - \frac{\omega_\phi}{\omega} \cdot X_{Bi} \cdot \sin \beta}{\frac{\omega_\phi}{\omega} \cdot \cos \beta} \quad (2.40)$$

Таким чином, визначаються координати першої точки характеристики для кожного зуба у групі, що відповідають точці B_i , розташованій на межі ділянок поверхні зуба.

Координати другої точки характеристики, розташованій на твірній відповідної точки A не змінюються для кожного профілю зуба у групі, та розраховуються за залежностями 2.12 і 2.13:

Координати Z точки A визначаються за рівнянням контакту при нахилений осі інструменту (2.30).

Координати X , Y точки характеристики, розташованій на твірній, що відповідає точці C_i змінюються для кожного профілю зуба у групі та будуть розраховуватися за залежностями 2.16 і 2.17:

Координата Z точки C_i характеристики на потиличній площини зуба визначається за рівнянням контакту:

$$Z_{Ci} = \frac{\omega}{\omega_\phi} \cdot \frac{(X_{Ci} + Y_{Ci} \cdot \operatorname{ctg}(\theta - \psi))}{\cos \beta} - \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{ctg}(\theta - \psi) \cdot (Y_{Ci} - a) - X_{Ci} \cdot \operatorname{tg} \beta \quad (2.41)$$

Знаючи координати точок прямолінійних характеристик в системі XYZ за формулами перетворення координат (2.25-2.27) розраховуються координати точок характеристик в системі $X_\phi Y_\phi Z_\phi$.

Три точки $A(X_\phi Y_\phi Z_\phi)$, $B_i(X_\phi Y_\phi Z_\phi)$, $C_i(X_\phi Y_\phi Z_\phi)$, належать прямолінійній характеристиці, та координати яких для кожного зуба мають своє значення, Вони визначають положення передньої площини проектованої дискової обкатної фрези в системі координат $X_\phi Y_\phi Z_\phi$.

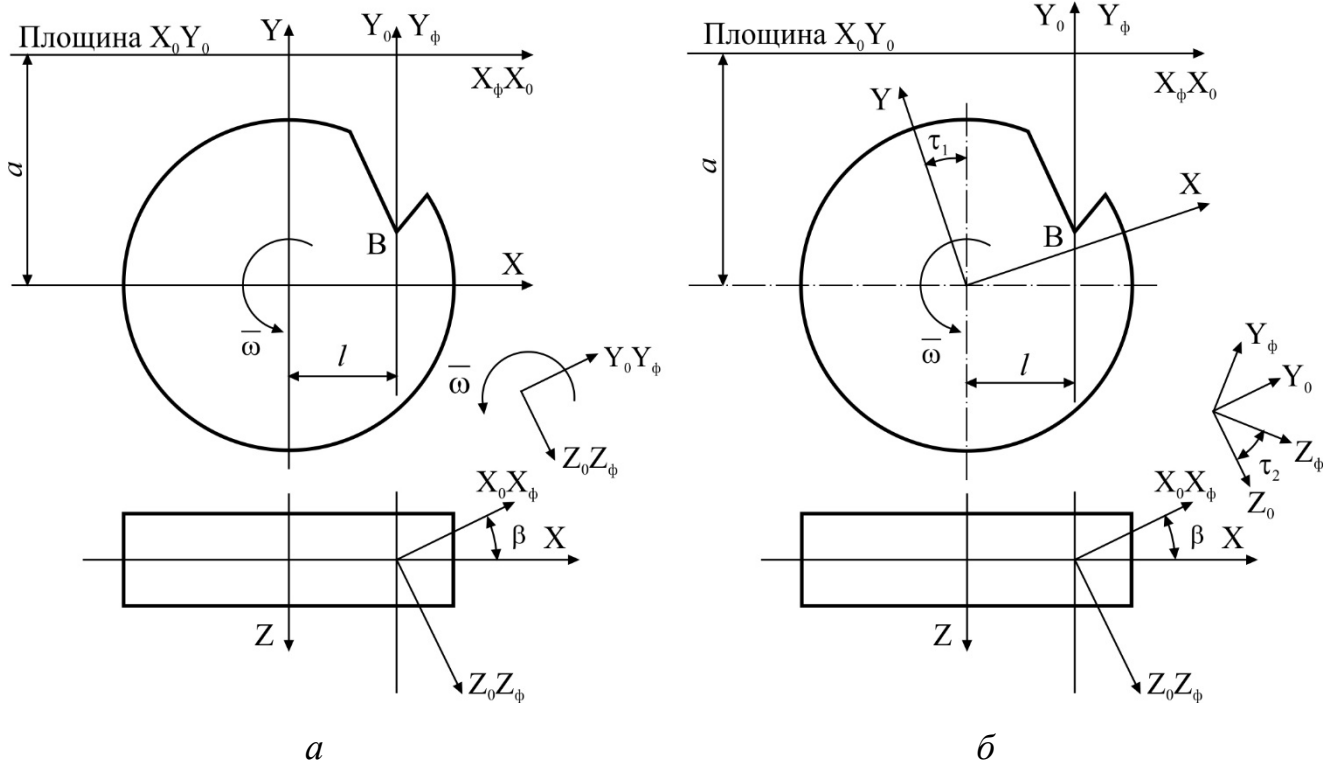
Для перевірки розрахункових формул при обробці прямозубих стружкових канавок без перехідних кривих при похилій установці осі дискової обкатної фрези відносно осі пили [47,48,68], розглянемо схему обробки заданою обкатною фрезою, при якій заготовка пили обертається навколо своєї осі з кутовою швидкістю $\bar{\omega}$, обкатна фреза обертається навколо своєї осі з кутовою швидкістю ω_ϕ .

Осі інструменту і заготовки є мимобіжними прямими, вісь обкатної фрези встановлена нахилена до осі відрізної пили під кутом β . В процесі обробки здійснюється тільки радіальна подача, в результаті чого фреза заглиблюється в матеріал заготовки безпосередньо в процесі формування оброблюваної поверхні, коли фреза заглибилася на необхідну величину в заготовку, радіальна подача відключається. Формування оброблюваної поверхні відбувається таким чином при двох взаємопов'язаних обертаннях навколо осей пили та інструменту.

З пилою пов'яжемо систему координат XYZ , з дисковою обкатною фрезою - систему $X_\phi Y_\phi Z_\phi$. Введемо також нерухому систему координат $X_O Y_O Z_O$. Взаємне розташування систем координат в початковий момент часу зображено на рис.2.10 - а.

За вісь деталі прийнята вісь Z , за вісь інструменту прийнята вісь X_ϕ . Положення осей XYZ щодо осей $X_\phi Y_\phi Z_\phi$ характеризується параметрами a і l і кутом β . Будемо вважати, що за довільний момент часу система XYZ повернулася на кут τ_1 , а система $X_\phi Y_\phi Z_\phi$ - на кут τ_2 . Кути τ_1 і τ_2 пов'язані співвідношенням:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{Z_0}{Z}$$



a – початковий момент часу; b – довільний момент часу

Рисунок 2.10 – Схема взаємного розташування систем координат [48]

Положення систем координат в довільний момент часу зображено на рис.2.10 - б. У цьому випадку формули перетворення координат будуть:

$$X = \cos \tau_1 \cdot [l + X_\phi \cdot \cos \beta + (Z_\phi \cdot \cos \tau_2 - Y_\phi \cdot \sin \tau_2) \cdot \sin \beta] + [a + Y_\phi \cdot \cos \tau_2 + Z_\phi \cdot \sin \tau_2] \cdot \sin \tau_1 \quad (2.42)$$

$$Y = [a + Y_\phi \cdot \cos \tau_2 + Z_\phi \cdot \sin \tau_2] \cdot \sin \tau_1 - \sin \tau_1 \cdot [l + X_\phi \cdot \cos \beta + (Z_\phi \cdot \cos \tau_2 - Y_\phi \cdot \sin \tau_2) \cdot \sin \beta] \quad (2.43)$$

$$Z = \cos \beta \cdot [Z_\phi \cdot \cos \tau_2 - Y_\phi \cdot \sin \tau_2] - X_\phi \cdot \sin \beta \quad (2.44)$$

Поверхня западини зуба пили буде описуватися різальною кромкою зуба обкатної фрези при її русі відносно заготовки пили. Визначимо профіль цієї поверхні в площині $Z=0$. Будемо вважати, що обробка ведеться фрезою з кутами $\gamma_i=0$ і $\lambda_i=0$, тобто передньою площиною фрези буде площина, яка проходить через її вісь. За цю площину приймемо площину $Y_\phi=0$.

Профіль западини зуба пили визначимо в площині $Z=0$. За формулами перетворення координат, при $Z=0$ и $Y_\phi=0$ будемо мати:

$$Z_\phi \cdot \cos \tau_2 = X_\phi \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (2.45)$$

$$X = \cos \tau_1 \cdot [l + X_\phi \cdot \cos \beta + Z_\phi \cdot \cos \tau_2 \cdot \sin \beta] + [a + Z_\phi \cdot \sin \tau_2] \cdot \sin \tau_1, \quad (2.46)$$

$$Y = [a + Z_\phi \cdot \sin \tau_2] \cdot \cos \tau_1 - \sin \tau_1 \cdot [l + X_\phi \cdot \cos \beta + Z_\phi \cdot \cos \tau_2 \cdot \sin \beta]. \quad (2.47)$$

Обробка відрізних пил з нерівномірним кроком обкатними фрезами можлива як при установці осі дискової обкатної фрези перпендикулярно до осі відрізної пили, так при нахиленій установці. Але, як показав аналіз умов формоутворення профілів відрізних пил, при установці осі обкатної фрези перпендикулярно в западини зуба відрізної пили виникають перехідні поверхні.

2.5 Визначення перехідних поверхонь при установці осі дискової обкатної фрези перпендикулярно до осі пили

При обробці западини зуба відрізної пили при установці осі дискової обкатної фрези перпендикулярно до осі пили, радіуси кривизни виникаючих перехідних поверхонь можуть бути більші, ніж нормовані радіуси заокруглень западини зубів відрізної пили, або лежати в межах їх допустимих значень. Для визначення можливості обробки западин зубів відрізних пил обкатними фрезами з допустимим значеннями радіусів заокруглення перехідних кривих, в цьому випадку, необхідно визначити їх розміри.

Аналітично визначимо залежності, які характеризують розміри перехідних кривих. При обробці відрізної пили кути повороту обкатної фрези та заготовки, як відомо, пов'язані залежністю:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{Z_0}{Z}$$

При відомому радіусі обкатної фрези кут повороту її зуба, при обробці канавки зуба відрізної пили, яка має ширину b (рис.2.11), дорівнює:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\tau_2}{2}\right) = \frac{b}{2 \cdot R_{0\min}} \quad (2.48)$$

Величина h_n , яка буде характеризувати висоту перехідної кривої дорівнює

$$h_n = \operatorname{tg}\left(\frac{\tau_2}{2}\right) \cdot \frac{b}{2} \quad (2.49)$$

Профіль канавки зуба пили в вихідному перерізі позначено як ABC . Положення цього перерізу в системі координат XYZ , пов'язаною з відрізною пилою, характеризує параметри установки обкатної фрези відносно заготовки пили на верстаті. Положення цього перерізу відповідає положенню зуба обкатної фрези, коли його вершина знаходиться в осьовій площині. Таким чином, на початку обробки вершинна точка зуба обкатної фрези знаходиться в точці B' , а в кінці обробки – в точці k .

Визначимо величину l_n , яка характеризує ширину перехідної кривої. В системі координат XYZ можна записати:

$$l_n = X_k - X_{B'} \quad (2.50)$$

Визначимо координати точок $X_k Y_k$ та $X_{B'} Y_{B'}$. Як відомо, координати точки B при перпендикулярної установці осі обкатної фрези до осі заготовки пили дорівнюють (2.14, 2.15):

$$X_B = 0,5 \cdot D \cdot \sin(\psi + \gamma) - H \cdot \sin \psi$$

$$Y_B = 0,5 \cdot D \cdot \cos(\psi + \gamma) - H \cdot \cos \psi$$

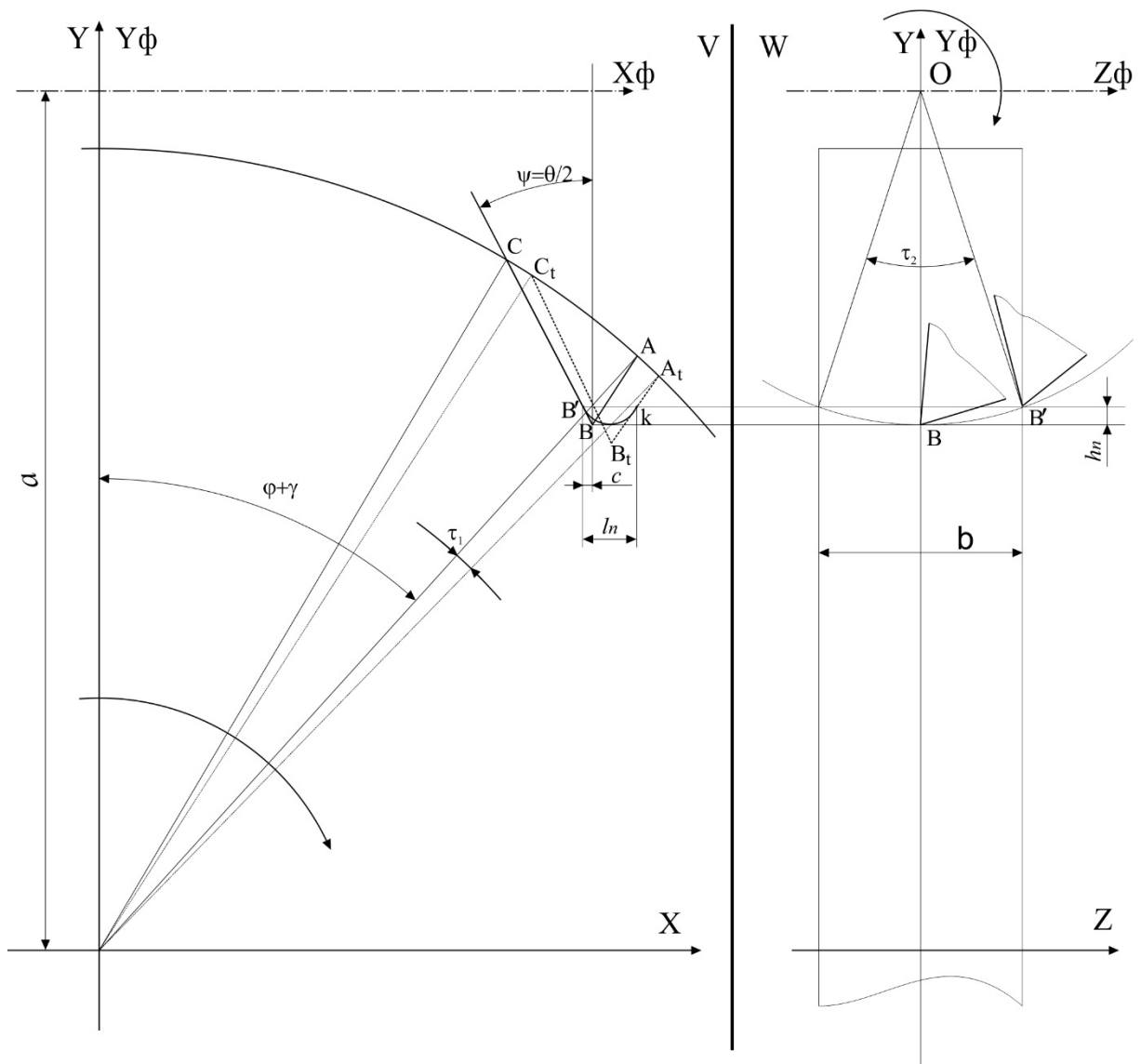


Рисунок 2.11 – Схема визначення розмірів перехідних кривих при перпендикулярній установці осі обкатної фрези до осі заготовки пили

Координати точки B' запишемо, як:

$$\begin{aligned} X_{B'} &= X_B - c \\ Y_{B'} &= Y_B + h_n \end{aligned} \quad (2.51)$$

де величина $c = \operatorname{tg} \psi \cdot h_n$

Координати точки k , будемо визначати, як координати точки перетину прямої $Y_B = Y_{B'}$ та прямої $A_t B_t$.

Координати точок A_t та B_t запишемо наступним чином:

$$\begin{aligned} X_{A_t} &= 0,5 \cdot D \cdot \sin(\psi + \gamma + \tau_1) \\ Y_{A_t} &= 0,5 \cdot D \cdot \cos(\psi + \gamma + \tau_1) \end{aligned}$$

$$X_{Bt} = X_{At} - H \cdot \sin(\psi + \tau_1)$$

$$Y_{Bt} = Y_{At} - H \cdot \cos(\psi + \tau_1)$$

Для знаходження точки перетину двох прямих запишемо рівняння:

$$\frac{X_k - X_{At}}{X_{Bt} - X_{At}} = \frac{Y_k - Y_{At}}{Y_{Bt} - Y_{At}}$$

Вирішуючи рівняння відносно координати X_k , отримаємо:

$$X_k = \frac{X_{At} \cdot Y_{Bt} + Y_k \cdot (X_{Bt} - X_{At}) - Y_{At} \cdot X_{Bt}}{Y_{Bt} - Y_{At}} \quad (2.52)$$

За формулами (2.49) та (2.50) визначаємо висоту та довжину сегмента дуги, яку описує вершина зуба обкатної фрези. Знаючи розміри сегмента дуги визначимо радіус перехідної кривої за відомою залежністю:

$$r_n = \frac{h_n}{2} + \frac{l_n^2}{8 \cdot h_n} \quad (2.53)$$

Визначення розмірів перехідних поверхонь при установці осі обкатної фрези перпендикулярно до осі відрізної пили дає можливість з'ясувати за яких параметрах оброблюваної заготовки відрізної пили відхилення обробленої поверхні від її заданих (нормованих – радіус западини зуба пили) розмірів лежать в допустимих межах і обробка при такій установці можлива у відповідності з кресленням.

За розробленою теорією формоутворення проводиться проектування обкатної фрези з нерівномірним кроком.

Висновки

На основі загальної теорії формоутворення поверхонь розроблена теорія утворення дискових обкатних фрез для обробки зубів відрізних пил з різним значенням кроку зубів по зовнішньому колу (нерівномірний крок).

Показано, що кількість зубів обкатної фрези, розташування різальної кромки та глибина стружкової канавки визначається кількістю зубів в групі з нерівномірним кроком та параметрами нерівномірності.

На основі виконання другої умови формоутворення визначено мінімально допустимий розрахунковий діаметр дискової обкатної фрези, та

показано, що він залежить від діаметра та числа зубів відрізної пили, від максимальних кутового кроку та висоти зуба в групі, від головного кута в плані та переднього кута відрізної пили, а також від числа зубів дискової обкатної фрези, яке дорівнює числу зубів у групі відрізної пили.

Доведено, що утворення стружкових канавок відрізних пил з нерівномірним кроком без перехідних кривих забезпечується виконанням третьої умови формоутворення за рахунок визначення спільної швидкості руху точок, які належать лінії перетину суміжних ділянок поверхні пили.

Виведені залежності для розрахунку розмірів заокруглень перехідних кривих виникаючих в западині зуба відрізної пили при установці осі обкатної фрези перпендикулярно до осі заготовки пили.

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ДИСКОВИХ ОБКАТНИХ ФРЕЗ З НЕРІВНОМІРНИМ КРОКОМ

На базі розробленої теорії формоутворення дискових обкатних фрез для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком розглядається задача розробки конструкції цієї фрези.

Конструкція дискової обкатної фрези характеризується двома групами параметрів: які розраховуються за залежностями, визначеними на основі положень теорії формоутворення відрізних пил з нерівномірним кроком обкатними фрезами та параметрами, які рекомендуються нормативними документами та літературними джерелами [ГОСТ 10996-64, ГОСТ 28527-90 (ИСО 2587-72), ГОСТ 9472-90, ГОСТ 9324-2015 (ISO 2490:2007, ISO 4468:2009)].

До першої групи конструктивних параметрів відносяться:

- розрахунковий мінімальний діаметр та зовнішній діаметр обкатної фрези з врахуванням переточок;
- параметри нерівномірності кроків відрізних пил (кутовий крок зубів, кількість зубів в групі;
- координати граничних точок прямолінійних різальних кромок;
- радіус кожного зуба;
- зміщення вершин зубів відносно центру осьової площини.

До другої групи параметрів відносяться:

- діаметр отвору під оправку;
- ширина фрези;
- висота та довжина зуба;
- діаметр та ширина ступиці;
- висота та ширина шпонкового пазу.

При розробці конструкції дискової обкатної фрези першочерговою задачею є визначення її зовнішнього діаметра, який би в найбільшій мірі задовольняв вимогу, щодо експлуатації цього інструменту.

При визначенні розмірів зовнішнього діаметра необхідно враховувати, що зі збільшенням зовнішнього діаметра можна застосовувати оправки більшого діаметра. Це дозволяє працювати зі збільшеними навантаженнями, так як оправка буде більш жорсткою і міцною. Крім того, фрези більшого діаметру мають кращі умови для відводу тепла. При обробці такими фрезами зростає дуга контакту зубів з заготовкою. Все це сприяє підвищенню якості обробленої поверхні і стійкості інструменту. Проте зі збільшенням діаметра фрези підвищується витрата матеріалу та вартість інструменту [72,75,87,89].

Зовнішній діаметр обкатної фрези з врахуванням переточувань залежить від її мінімального розрахункового діаметра – D_{0min} . З точки зору виконання другої умови формоутворення стружкових канавок відрізних пил D_{0min} визначаються параметрами нерівномірності зубів пили в групі, до яких належать кількість зубів в групі та їх кутові кроки.

3.1 Визначення параметрів нерівномірності відрізних пил

Параметри нерівномірності відрізних пил залежать від загальної кількості зубів пили та від значення їх окружного кроку. Кількість зубів пили повинна бути кратна кількості груп. Крок зуба відрізної пили впливає на здатність видаляти стружку із зони розпилу. Так, згідно загальним рекомендаціям: чим більший перетин матеріалу, тим більшою повинна бути відстань між зубцями і навпаки [111,114,119,121].

Розміри стружкової канавки у зубів прямолінійного профілю обумовлюються висотою зуба. Замала кількість зубів у зоні різання може призвести до незбалансованого навантаження на різальну кромку та руйнування зубів. При великій кількості зубів зменшуються розміри западини зуба, що призводить до погіршення відводу стружки та нагріву зубів.

Як правило, користуються наступним правилом вибору кроку зубів відрізної пили: для суцільних матеріалів - в зоні різання повинно бути не

менше трьох зубів одночасно, для профільних матеріалів - товщина стінки повинна бути не меншою за відстань між двома сусідніми зубами.

Форму зубів прямолінійного профіля, формоутворення якої досліджується в роботі, згідно рекомендаціям, використовують при відрізці тонкостінних труб та профілів, та використовують при цьому відрізні пили великих діаметрів $D \geq 200 \text{ мм}$ з кроком зубів $T = 0,8 \div 3 \text{ мм}$ [33,114,119].

Багаторічний виробничий досвід дозволяє вважати, що максимальне рекомендоване значення кількості зубів при обраному діаметрі відрізної пили для певних умов відрізки визначає мінімальне значення окружного кроку при яких забезпечується робота пили без поломки зубів.

Це положення вважатимемо обмеженням при виборі кількості зубів в групі з нерівномірним кроком і допустимого значення мінімального кроку в групі.

Кількість нерівномірних зубів у групі та закону їх розподілення слід вибирати з позицій оцінки мінімального значення критерію динамічного стану різних конструкцій пил C_{rmax} [33].

Взагалі, нерівномірність кроку у групі задається за законом трикутника, або розподіленням їх по відношенню до номінального кроку [33,76]. За законом трикутника величина Δ нерівномірності кроку зубів приймається у відсотках від номінального кроку.

Так, за рекомендаціями [33,76], при відрізці труб пилами з $Z_{gr}=6$ слід приймати нерівномірність кроку при розбивці нерівномірності кроків по закону трикутника $\Delta = (15 \dots 20)\%$, а також розподілення їх по відношенню до номінального кроку – $K = 0,7-0,9-1,3-1,1-0,8-1,2$, з $Z_{gr}=8$ – по закону трикутника $\Delta = 10\%$. Менші значення нерівномірності, особливо при великій кількості зубів відрізної пили наближують кутові кроки у групі до рівномірних значень. З ростом кількості зубів в групі з нерівномірним кроком і значення нерівномірності кроків в групі Δ з розбивкою по

трикутника збільшується ймовірність поломки одного з зубів в групі через зменшення окружного кроку, а отже, і розмірів канавки [33,62].

Враховуючи прийняте нами обмеження по допустимому мінімального кроку аналізуючи дані табл. 3.1, наприклад, при обраному за рекомендаціями потрібному мінімальному кутовому кроку $T=3$ мм, обирати відрізну пилу з нерівномірним кроком $\varnothing 315$ мм с $Z_{gr}=4$ та $Z=204$, у якої мінімальний крок $T_{min}=3,40$ мм з $\Delta = 30\%$, або обрати пилу цього ж діаметру с $Z_{gr}=6$ та $\Delta = 20\%$. Також можливо обрати пилу з $\varnothing 200$ мм с $Z_{gr}=4$, $Z=132$ та $\Delta = 30\%$, у якої мінімальний крок $T_{min}=3,33$ мм, з умови допуску на крок $T \pm 0,3$ мм.

Таблиця 3.1 – Значення мінімальних окружних кроків $T_{min} \pm 0,3$ мм

Діа-метр	Число зубів у групі	Не-ність	Загальна кількість зубів відрізної пили, Z													
			48	60	72	84	96	108	120	132	144	156	168	180	192	204
200 мм	4	0%	13,08	10,47	8,72	7,48	6,54	5,82	5,24	4,76	4,36	4,03	3,74	3,49	3,27	3,08
		10%	11,77	9,42	7,85	6,73	5,89	5,24	4,71	4,28	3,93	3,63	3,37	3,14	2,95	2,77
		20%	10,47	8,38	6,98	5,98	5,24	4,65	4,19	3,81	3,49	3,22	2,99	2,79	2,62	2,46
		30%	9,16	7,33	6,11	5,24	4,58	4,07	3,67	3,33	3,05	2,82	2,62	2,44	2,29	2,16
	6	0%	13,08	10,47	8,72	7,48	6,54	5,82	5,24	4,76	4,36	4,03	3,74	3,49	3,27	3,08
		10%	11,12	8,90	7,42	6,36	5,56	4,95	4,45	4,05	3,71	3,42	3,18	2,97	2,78	2,62
		20%	9,16	7,33	6,11	5,24	4,58	4,07	3,67	3,33	3,05	2,82	2,62	2,44	2,29	2,16
		30%	7,20	5,76	4,80	4,11	3,60	3,20	2,88	2,62	2,40	2,22	2,06	1,92	1,80	1,69
250 мм	4	0%	16,35	13,08	10,91	9,35	8,18	7,27	6,54	5,95	5,45	5,03	4,68	4,36	4,09	3,85
		10%	14,72	11,78	9,82	8,41	7,36	6,54	5,89	5,36	4,91	4,53	4,21	3,93	3,68	3,47
		20%	13,08	10,47	8,73	7,48	6,54	5,82	5,24	4,76	4,36	4,03	3,74	3,49	3,27	3,08
		30%	11,45	9,16	7,64	6,54	5,73	5,09	4,58	4,17	3,82	3,52	3,27	3,05	2,86	2,70
	6	0%	16,35	13,08	10,91	9,35	8,18	7,27	6,54	5,95	5,45	5,03	4,68	4,36	4,09	3,85
		10%	13,90	11,12	9,27	7,95	6,95	6,18	5,56	5,06	4,64	4,28	3,97	3,71	3,48	3,27
		20%	11,45	9,16	7,64	6,54	5,73	5,09	4,58	4,17	3,82	3,52	3,27	3,05	2,86	2,70
		30%	9,00	7,20	6,00	5,14	4,50	4,00	3,60	3,27	3,00	2,77	2,57	2,40	2,25	2,12
315 мм	4	0%	20,60	16,49	13,74	11,78	10,31	9,16	8,25	7,50	6,87	6,34	5,89	5,50	5,15	4,85
		10%	18,54	14,84	12,37	10,60	9,28	8,25	7,42	6,75	6,19	5,71	5,30	4,95	4,64	4,37
		20%	16,49	13,19	10,99	9,42	8,25	7,33	6,60	6,00	5,50	5,08	4,71	4,40	4,12	3,88
		30%	14,43	11,54	9,62	8,25	7,22	6,41	5,77	5,25	4,81	4,44	4,12	3,85	3,61	3,40
	6	0%	20,60	16,49	13,74	11,78	10,31	9,16	8,25	7,50	6,87	6,34	5,89	5,50	5,15	4,85
		10%	17,52	14,02	11,68	10,01	8,76	7,79	7,01	6,37	5,84	5,39	5,01	4,67	4,38	4,12
		20%	14,43	11,54	9,62	8,25	7,22	6,41	5,77	5,25	4,81	4,44	4,12	3,85	3,61	3,40
		30%	11,34	9,07	7,56	6,48	5,67	5,04	4,54	4,12	3,78	3,49	3,24	3,02	2,84	2,67

Щоб забезпечити максимально допустиму кількість переточувань без поломки зубів слід обирати більші значення діаметрів відрізних пил або зменшувати загальну кількість зубів при фіксованому значенні інших параметрів.

Таким чином, згідно табл. 3.1, визначаємо по рекомендованому мінімально допустимому кроку потрібні параметри нерівномірності Δ та кількість зубів у групі Z_{gr} , а також діаметр D , і загальну кількість зубів Z відрізної пили.

На рис. 3.1 показано сегмент відрізної пили с групою зубів $Z_{gr}=4$, та параметри, які характеризують нерівномірність зубів. Найбільша западина в групі ABC , кутовий крок якої ε_z , розміщена в вихідному положенні.

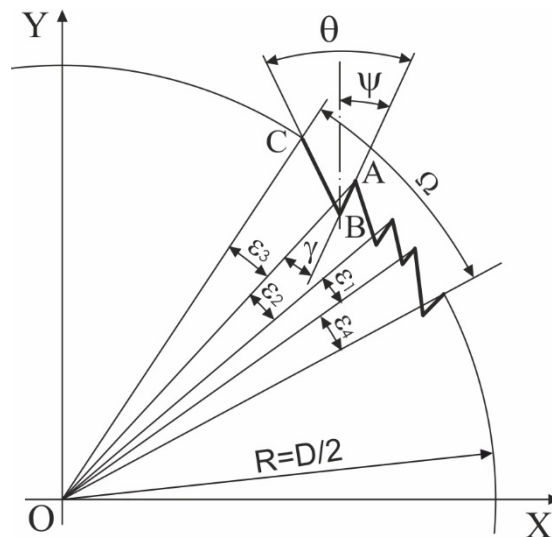


Рисунок 3.1 – Параметри нерівномірності профілів зубів відрізної пили с $Z_{gr}=4$, що характеризують нерівномірність профіля зуба обкатної фрези

Число груп зубів (n) та нормальний кутовий крок пили (ε_z) визначаються як:

$$n = \frac{Z}{Z_{gr}}; \quad \varepsilon_z = \frac{360}{Z} \quad (3.1)$$

Нерівномірність сусідніх зубів у групі відрізних пил (ε_{gr}), та кут, що охоплюється однією групою (Ω) визначаються за залежностями:

$$\varepsilon_{gr} = \frac{\Delta \cdot \varepsilon_z}{100} \quad (3.2)$$

$$\Omega = \frac{2 \cdot \pi}{n} \quad (3.3)$$

Значення мінімального кроку зубів в групі буде:

$$\varepsilon_0 = \frac{\Omega - n \cdot \varepsilon_{gr}}{Z_{gr}} \quad (3.4)$$

Визначення кроку зубів ε_i з різною кількістю їх в групі ($Z_{gr}=2,4,6,8$) наведені в таблиці 3.2 [33].

Таблиця 3.2 - Кутові кроки зубів в групі

№ зуба в групі									
Число зубів в групі	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6	ε_7	ε_8	$\Sigma \varepsilon_{gr}$
$Z_{gr}=2$	ε_0	$\varepsilon_0 + \varepsilon_{gr}$	-	-	-	-	-	-	ε_{gr}
$Z_{gr}=4$	ε_0	$\varepsilon_0 + \varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + 2\varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + \varepsilon_{gr}$	-	-	-	-	$4\varepsilon_{gr}$
$Z_{gr}=6$	ε_0	$\varepsilon_0 + \varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + 2\varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + 3\varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + 2\varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + \varepsilon_{gr}$	-	-	$9\varepsilon_{gr}$
$Z_{gr}=8$	ε_0	$\varepsilon_0 + \varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + 2\varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + 3\varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + 4\varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + 3\varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + 2\varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + \varepsilon_{gr}$	$16\varepsilon_{gr}$

Вихідні параметри, за якими проводиться розрахунок зовнішнього діаметра дискової обкатної фрези та її проектування наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Вихідні параметри за якими проектуються дискові обкатні фрези

Назва параметру	Позначення
Параметри заготовки відрізної пили, що задаються	
Діаметр	D
Кількість зубів	Z
Кількість зубів у групі	Z_{gr}
Товщина	B
Нерівномірність зубів у групі	Δ
Кут профілю канавки зуба (рис.3.1)	θ
Передній кут	γ
Параметри заготовки відрізної пили, що розраховуються	
Передавальне відношення та число груп зубів (3.1)	$U = n = \frac{Z}{Z_{gr}}$
Нерівномірність сусідніх зубів у групі (3.2)	ε_{gr}
Мінімальний кутовий крок зубів у групі (3.4)	ε_0

Кутовий крок сусідніх зубів у групі (табл.3.1)	ε_i
Глибина западини зуба по передній поверхні (рис.2.5), (2.20, 2.21)	H_i
Установча відстань між осями відрізної фрези і дискової обкатної фрези (2.24)	a
Зміщення осі обкатної фрези відносно осі заготовки відрізної пили (2.23)	l
Кут, який характеризує положення передньої площини профілю виробу після повороту (рис.3.1)	$\psi=0,5\theta$
Кут нахилу осі дискової обкатної фрези що до осі відрізної пили, (2.39)	β

3.2 Визначення зовнішнього діаметра дискової обкатної фрези

В основі визначення зовнішнього діаметра дискових обкатних фрез для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком лежить її розрахунковий діаметр, тобто радіус. Цей радіус розраховується за формулою (2.36), яка в розгорнутому виді запишеться:

$$R_{0\min} = \frac{0.5 \cdot D \cdot \sin\left(\frac{\varepsilon_{\max}}{2}\right) + H_{\max} \cdot \sin \gamma}{\sin(\psi + \gamma) \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{\varepsilon_{\max} \cdot Z}{2 \cdot Z_{gr}}\right)\right]} \quad (3.5)$$

В загальному випадку розрахунковий допустимий радіус залежить від діаметра пили (D), максимальної глибини стружкової канавки, виміряної по передній поверхні (H_{\max}), яка визначається максимальним кутовим кроком (ε_{\max}), передавальним відношенням Z/Z_0 , та кутом ψ , який приймається рівним половині кута профіля (θ) відрізної пили.

При розробці теоретичних положень проектування дискових обкатних фрез для обробки зубів пил з нерівномірним кроком та доцільності їх використання розглянемо вплив конструктивних параметрів пили на розрахунковий мінімальний діаметр обкатних фрез.

3.2.1 Вплив конструктивних параметрів відрізної пили на розрахунковий мінімальний діаметр дискової обкатної фрези

Дослідження впливу конструктивних параметрів пили (діаметр – D , загальна кількість зубів пили – Z , кількість зубів у групі – Z_{gr} , передній кут

– γ) на мінімальний розрахунковий діаметр обкатної фрези здійснювалось за залежністю (3.5).

Аналіз характеру зміни допустимого розрахункового мінімального діаметра обкатної фрези при $Z_{gr}=4$ і $Z_{gr}=6$ показує, що зі збільшенням діаметра відрізної пили та збільшенням кількості зубів з нерівномірним кроком в групі мінімальний діаметр обкатної фрези збільшується, а зі збільшенням загальної кількості зубів пили – зменшується (рис.3.2).

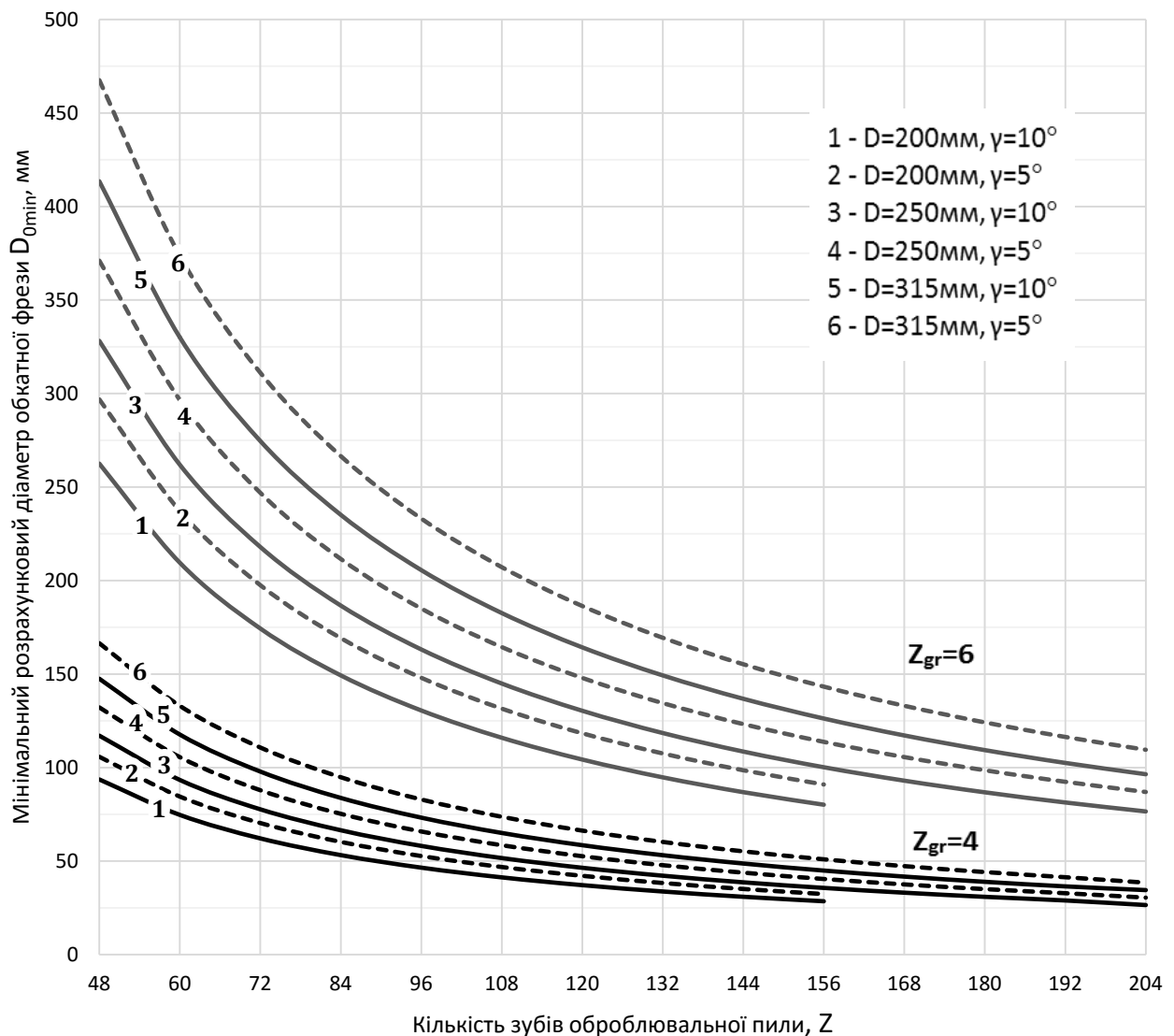


Рисунок 3.2 – Характер зміни розрахункового мінімального діаметра обкатної фрези

Так, для оброблюваної відрізної пили $\varnothing 200$ мм, з $Z=72$ та кількістю зубів з нерівномірним кроком в групі $Z_{gr}=4$ розрахунковий мінімальний

діаметр обкатної фрези змінюється від 60 мм до 70 мм в залежності від значення переднього кута пили γ , для пили $\varnothing 315 \text{ мм} - 92 \div 110 \text{ мм}$.

При тих же значеннях конструктивних параметрів оброблюваної пили з нерівномірним кроком в групі $Z_{gr}=6$, мінімальний діаметр фрези для пил $\varnothing 200 \text{ мм}$ лежить в межах $170 \div 195 \text{ мм}$ в залежності від значення переднього кута, відповідно для пил $\varnothing 315 \text{ мм} - 270 \div 300 \text{ мм}$.

Слід відзначити, що менші діаметри фрез відповідають переднім кутам $\gamma=10^\circ$, більші – $\gamma=5^\circ$.

Проведені дослідження показують, що вплив переднього кута пили зменшується зі збільшенням кількості зубів відрізної пили.

Наведений аналіз та аналіз графічних залежностей показує, що утворення зубів пил обкатними фрезами в порівнянні з іншими способами найбільш доцільне при великій кількості зубів пили. Крім того, з точки зору економії швидкорізальної сталі цільних обкатних фрез, слід рекомендувати обробляти такими фрезами відрізни пили з кількістю нерівномірних зубів в групі $Z_{gr}=4$.

Визначивши залежність розрахункових мінімальних діаметрів обкатних фрез від параметрів оброблюваних ними пил при проектуванні фрез необхідно збільшувати їх розрахункові діаметри враховуючи можливість переточок.

3.2.2 Визначення зовнішнього діаметра фрези з урахуванням переточок

В роботі розглядається проектування гострозаточених фрез з прямолінійними різальними кромками. Їх заточування здійснюється по задніх поверхнях [40,75], по яких, головним чином, відбувається їх знос (рис.3.3).

Гострозаточені фрези мають підвищену стійкість і продуктивність та забезпечують зменшення параметрів шорсткості оброблюваної поверхні в порівнянні з затилованими [75,87].

Форма зубів фрез повинна бути такою, щоб забезпечувалась необхідна міцність зуба, допускалося якомога більша кількість переточувань та об'єм канавок між зубами повинен бути достатнім для розміщення стружки.

Згідно [40] отримана розрахункова формула сточування за одну переточку:

$$h_{cm} = \frac{f_3 \cdot \sin \alpha_e + k}{\cos(\alpha_e + \gamma_e)} \cdot \cos \gamma_e \quad (3.6)$$

де f_3 - фаска зносу по задній поверхні;

k - додатковий припуск на заточку.

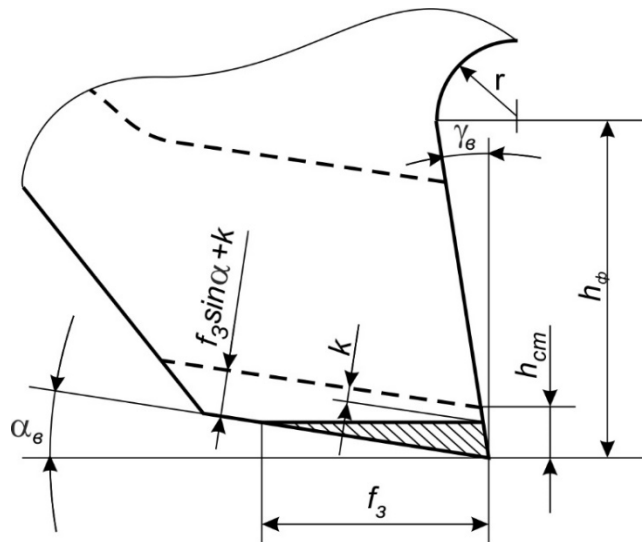


Рисунок 3.3 – Схема зносу гострозаточених фрез

Щоб визначити кількість допустимих переточувань, необхідно знати висоту зуба таких фрез.

Для дискових обкатних фрез з великим зубом висота зуба визначається залежністю [73,75]:

$$h_\phi = (0.3...0.45) \cdot \frac{\pi \cdot D_\phi}{Z_0} \quad (3.7)$$

де D_ϕ - зовнішній діаметр дискової обкатної фрези;

Z_0 – кількість зубів дискової обкатної фрези.

Радіус заокруглення западини канавки зуба [73,75]

$$r_\phi = (0.4...0.75) \cdot h_\phi \quad (3.8)$$

За рекомендаціями [29,73,75,98] з умови розміщення стружки зуб фрези сточують по висоті на величину не більш ніж $0.75h_\phi$. Тобто зуб обкатної фрези можна сточувати до мінімальної висоти $h_{\phi min}$:

$$h_{\phi min} = 0.75 \cdot h_\phi \quad (3.9)$$

За одне переточування, згідно рекомендацій [40] для фрез з швидкорізальних сталей знімається $h_{zm}=0.3-0.5$ мм.

Визначимо мінімальну кількість переточувань зуба обкатної фрези. Прийmemo, згідно (3.7), що мінімально допустима висота зуба обкатної фрези буде:

$$h_\phi = 0.3 \cdot \frac{\pi \cdot D_{0min}}{Z_0}$$

Тоді можна записати залежність для визначення мінімальної кількості переточок зуба фрези:

$$K_{min} = \frac{0.5 \cdot D_{0min}}{Z_0} \quad (3.10)$$

З умови максимально допустимої висоти сточування зуба фрези (3.9) та формули для розрахунку висоти зуба (3.7), мінімальний розрахунковий діаметр слід збільшити на величину допустимого сточування зуба.

Таким чином формулу для розрахунку зовнішнього діаметра обкатної фрези з урахуванням переточувань запишемо як:

$$D_{\phi min} = \frac{D_{0min} \cdot (Z_0 + 0.471)}{Z_0} \quad (3.11)$$

Визначення зовнішнього діаметра обкатної фрези з урахуванням переточувань, та формули для розрахунку наведені у табл. 3.4.

При перевірці третьої умови теорії формоутворення було доведено, що при утворенні обкатною фрезою западин зубів пили, при установці її осі перпендикулярно до осі заготовки відрізної пили, в западині зуба виникають перехідні криві. Розмір цих кривих впливає на умови розміщення стружки і має важливе значення. Нормативними документами та фірмами-виробниками визначаються розміри радіуса западин зубів відрізних пил.

Таблиця 3.4 – Зовнішній діаметр обкатної фрези з урахуванням переточувань

№	Параметр	Позначення	Формула
1	Мінімальний розрахунковий зовнішній діаметр, мм	D_{0min}	$D_{0min} = \frac{D \cdot \sin\left(\frac{\varepsilon_{max}}{2}\right) + H_{max} \cdot \sin \gamma}{\sin(\psi + \gamma) \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\varepsilon_{max} \cdot Z}{2 \cdot Z_{gr}}\right)\right)}$
2	Допустима висота зуба, мм	$h_{\phi min}$	$h_{\phi} = 0.3 \cdot \frac{\pi \cdot D_{0min}}{Z_0}$
3	Мінімальна кількість допустимих переточок	K_{min}	$K_{min} = 0.5 \cdot \frac{D_{0min}}{Z_0}$
4	Зовнішній діаметр з урахуванням переточок, мм	$D_{\phi min}$	$D_{\phi min} = \frac{D_{0min} \cdot (Z_0 + 0.471)}{Z_0}$

Наприклад, величина радіуса заокруглення западини зуба за нормами ГОСТ 2679-93 (ISO 2296-72) повинна бути, при діаметрі відрізної пили $D \geq 200 \text{ мм}$, не більш ніж 0,4 мм, а для $D = 315 \text{ мм}$ – не більш ніж 0,5 мм. Згідно європейським стандарти DIN1837, DIN1838, DIN1840 радіуси заокруглення западини зуба залежать від кроку t , та мають дещо більші розміри.

В залежності від загальної кількості зубів та кількості зубів у групі відрізної пили радіуси кривизни перехідних кривих, які утворюються при обробці западини зуба, приймають певні значення, величини яких можуть бути більші або менші ніж радіуси заокруглення западини зуба, що нормуються. Якщо ці радіуси кривизни менші або лежать в межах допуску радіуса заокруглення западини зуба, прийнятною є установка осі дискової обкатної фрези перпендикулярно до осі відрізної пили.

3.2.3 Залежність кривизни перехідних кривих та діаметрів обкатних фрез від параметрів відрізних пил

Для визначення величин радіусів кривизни перехідних кривих, що утворюються в западині зуба при установці осі обкатної фрези перпендикулярно до осі заготовки відрізної пили, використовуємо раніше

виведені залежності (2.50-2.52). При цьому вважаємо відомим мінімальний зовнішній діаметр найбільшого зуба обкатної фрези з урахуванням переточувань, а вершина зуба обкатної фрези не має радіуса заокруглення. Як показали попередні розрахунки, перехідні поверхні більшого розміру виникають на зубі обкатної фрези, що обробляє канавку відрізної пили найменшого кутового кроку.

На рис.3.4 показано залежність розміру кривизни перехідних кривих від загальної кількості зубів, кількості зубів у групі, діаметра та товщини оброблювальної відрізної пили.

За результатами досліджень встановлено (рис.3.4), що найбільший вплив на розміри перехідної кривої має загальна кількість зубів відрізної пили.

Розміри радіуса кривизни перехідної кривої різко зростають при зменшенні загальної кількості зубів пили. При одному і тому ж оброблювальному діаметрі відрізної пили на розміри перехідних кривих впливає кількість зубів у групі та товщина заготовки пили. Зі збільшенням кількості зубів у групі перехідні криві зменшуються, а при збільшенні товщини диску заготовки відрізної пили – незначно збільшуються, та найменша різниця між значеннями радіуса кривизни перехідної кривої має місце при формоутворенні відрізних пил з малою кількістю зубів і при її збільшенні ця різниця збільшується (рис.3.4).

За отриманими даними розрахунків при збільшенні кількості зубів відрізної пили значення радіуса кривизни перехідної кривої наближається до значення нормованого радіуса заокруглення западини зуба пили. Величини цього радіуса згідно ГОСТ 2679-93 (ISO 2296-72) зображені на рисунку 3.4 двома горизонтальними лініями.

Так, наприклад, при формоутворенні відрізної пили діаметром $D=315\text{мм}$, $Z_{gr}=4$ та $B=1,8\text{мм}$ та кількістю зубів $Z \geq 156$, обкатною фрезою мінімального зовнішнього діаметра, розмір радіуса кривизни перехідної

кривої набуває значень $r_n \leq 0,5 \text{ мм}$, що є в межах допустимого значення за нормативними документами. Теж саме спостерігається, наприклад, при обробці відрізної пили діаметром $D=200 \text{ мм}$, $Z_{gr}=6$ та $B=2,5 \text{ мм}$ та кількістю зубів $Z \geq 96$, де радіус заокруглення канавки зуба має бути $r \leq 0,4 \text{ мм}$.

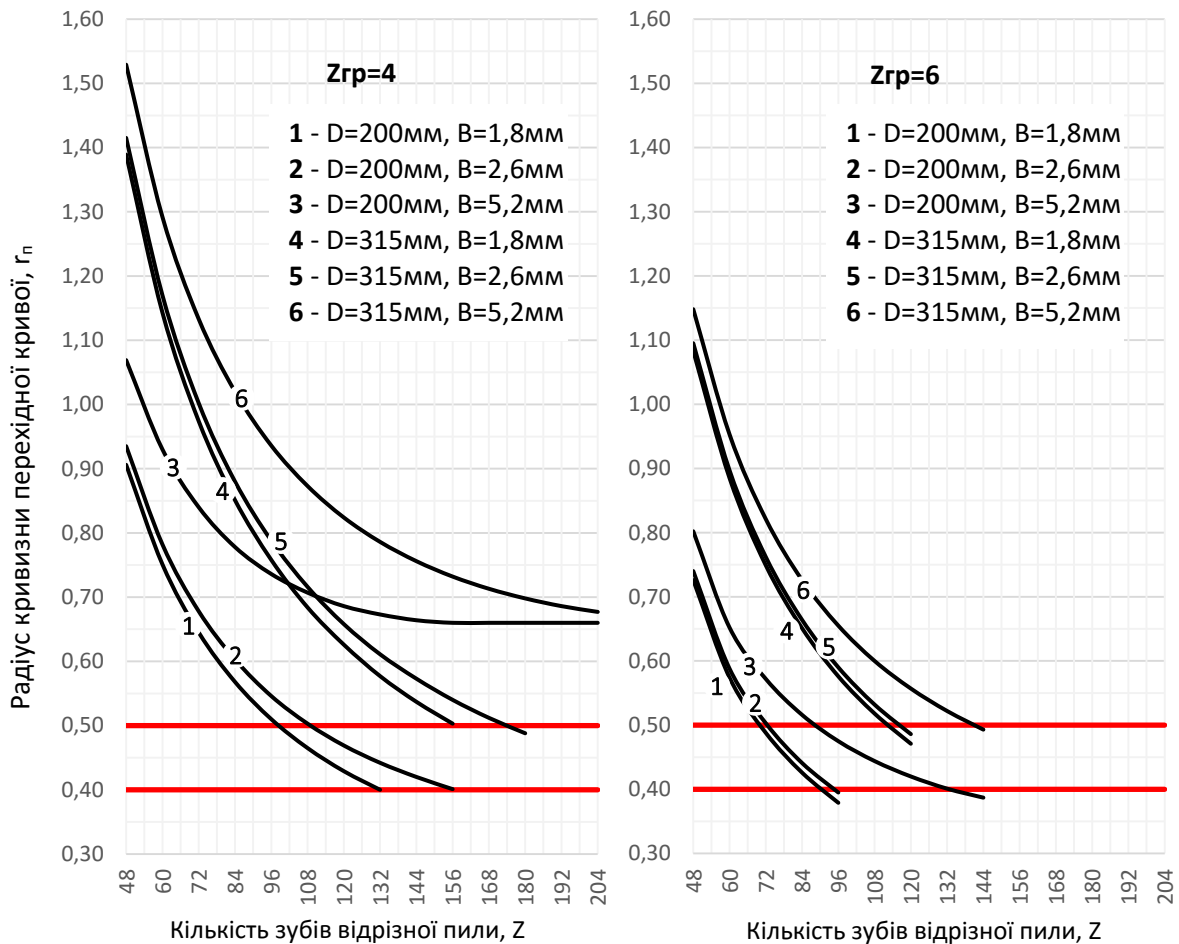


Рисунок 3.4 – Радіуси кривизни перехідних кривих в западині зуба, що має найменший кутовий крок, при $\gamma=10^\circ$

Таким чином, зі збільшенням загальної кількості зубів відрізної пили можлива обробка при установці осі обкатної фрези перпендикулярно до осі заготовки пили.

При відносно невеликій кількості зубів пили і при установці осі дискової обкатної фрези перпендикулярно до осі відрізної пили виникають порівняно великі за розмірами перехідні поверхні. Щоб зменшити розміри перехідних поверхонь, та виконати третю умову формоутворення

використовують нахилenu установку осі дискової обкатної фрези по відношенню до осі пили [44,58,68,74].

Від параметрів відрізнних пил залежать діаметри обкатних фрез.

На рис. 3.5 наведено графік залежності діаметра найбільшого зуба обкатної фрези від конструктивних параметрів відрізнних пил з нерівномірним кроком в групі.

З теорії формоутворення зубів відрізнних пил обкатними фрезами, для виконання її другої умови, діаметри обкатної фрези можуть збільшуватись, тому є можливість обробляти відрізни пили з різними параметрами, обкатною фрезою одного діаметра, лише використовуючи різну заточку її по задніх поверхнях.

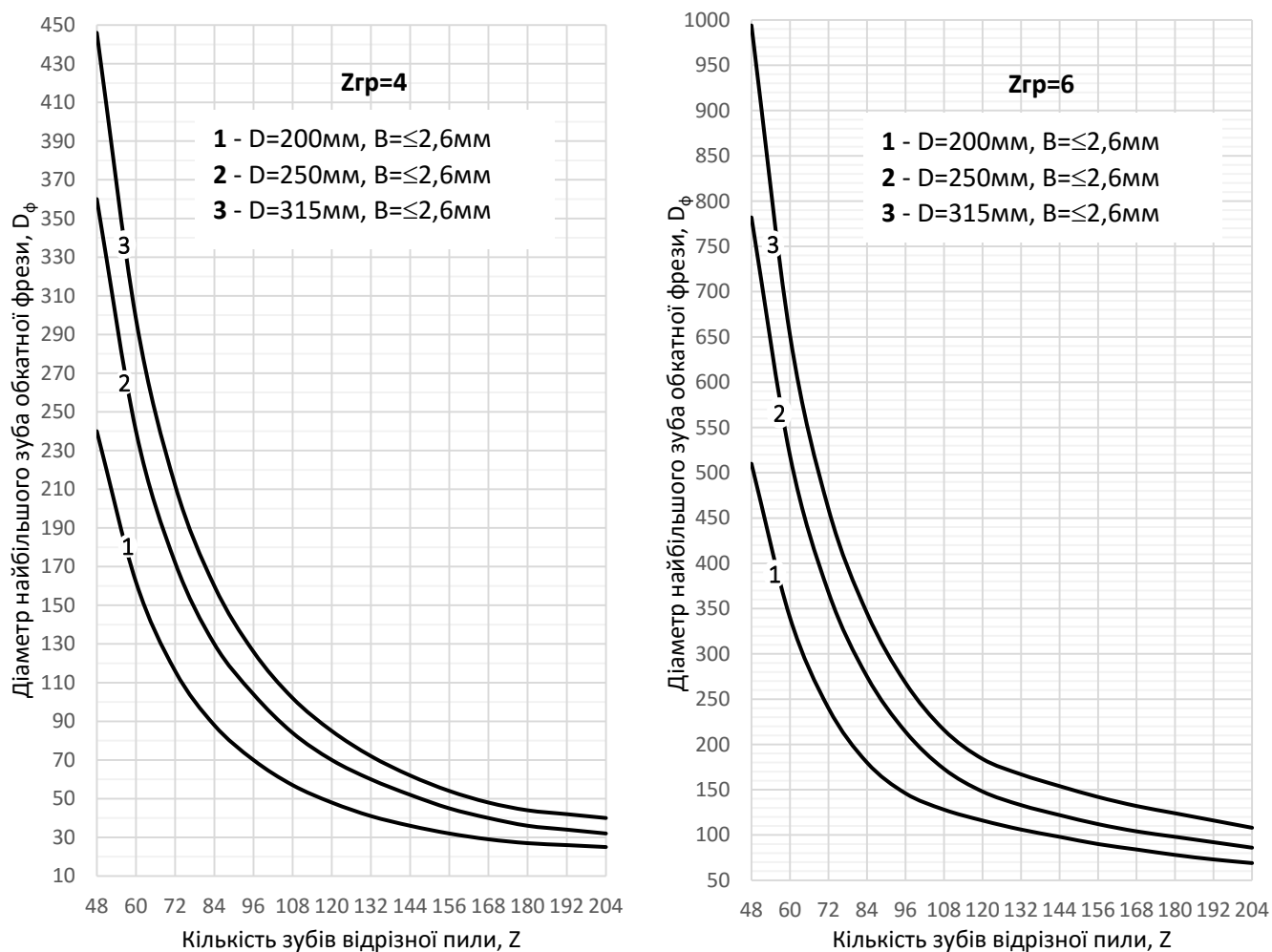


Рисунок 3.5 – Діаметри обкатної фрези для обробки відрізнних пил з різними параметрами, при $\gamma=10^\circ$

Так, відповідно до рисунка 3.5 обкатною фрезою діаметра $D=115\text{мм}$ можливо обробляти відрізни пили $D=200\text{мм}$, $Z_{gr}=4$ та $B\geq 1,8\text{мм}$ та загальною кількістю зубів $Z\geq 72$ при установці осі обкатної фрези перпендикулярно до осі відрізної пили. Обкатною фрезою цього ж діаметру можливо також обробляти пили $D=250\text{мм}$, $Z_{gr}=6$ та $B\geq 1,8\text{мм}$ з загальною кількістю зубів $Z\geq 156$.

Однак, з рис. 3.5 видно, що для формоутворення профілів зубів відрізних пил з невеликою загальною кількістю зубів обкатними фрезами, величини їх діаметрів різко зростають, що унеможлиблює використання їх на зубофрезерних верстатах із-за їх розмірів та неекономічного використання інструментального матеріалу, особливо при виготовленні їх із швидкорізальних сталей.

Таким чином, після визначення розрахункового зовнішнього діаметра дискової обкатної фрези її зовнішній діаметр можна призначати декількома різними варіантами.

3.2.4 Методика визначення зовнішнього діаметра дискової обкатної фрези

Визначення зовнішнього діаметра дискової обкатної фрези проводять для найбільшого її зуба, який обробляє западину зуба відрізної пили з найбільшим окружним кроком у групі.

Методика визначення зовнішнього діаметра дискової обкатної фрези $D_{\phi \min}$ наступна:

1. За залежністю визначаємо мінімальний діаметр обкатної фрези:

$$D_{0\min} = \frac{D \cdot \sin\left(\frac{\varepsilon_{\max}}{2}\right) + H_{\max} \cdot \sin(\gamma)}{\sin(\psi + \gamma) \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\varepsilon_{\max} \cdot Z}{2 \cdot Z_{gr}}\right)\right)}$$

2. Визначаємо зовнішній діаметр обкатної фрези з урахуванням переточок:

$$D_{\phi \min} = \frac{D_{0 \min} \cdot (Z_0 + 0.471)}{Z_0}$$

3. Визначаємо спосіб встановлення осі обкатної фрези відносно осі заготовки відрізної пили. В залежності від необхідних параметрів оброблювальної відрізної пили та даних по розмірам перехідних кривих (рис. 3.4), визначаємо можливість обробки при встановлення осі обкатної фрези перпендикулярно до осі заготовки відрізної пили.
4. При установці осі обкатної фрези перпендикулярно до осі пили по графіку визначаємо потрібний зовнішній діаметр обкатної фрези (рис. 3.5).
5. Якщо неможливо обробити відрізну пилу при перпендикулярній установці осі обкатної фрези, приймаємо в якості зовнішнього діаметра розрахований за формулою п.2, та використовуємо нахилену установку обкатної фрези.

Проектування дискових обкатних фрез здійснюється з врахуванням двох груп параметрів, а саме – визначених за виведеними залежностями та рекомендованими нормативними документами та літературними джерелами.

3.3 Проектування дискових обкатних фрез

При проектуванні дискових обкатних фрез будемо використовувати метод, за основу якого беремо одиничні елементи вже відомих конструкцій ріжучого інструменту, а саме фрез дискових зуборізних модульних, фрез дискових тристоронніх та фрез черв'ячних. Вибір цих інструментів базується на подібності їх конструкції до дискових обкатних фрез або методу їх роботи - обкатки. Проектування дискових обкатних фрез включатимуть наступні етапи:

- проектування робочий частини;
- проектування приєднувальної частини;

– розробка технічних вимог.

3.3.1 Конструктивні параметри, які розраховуються за залежностями, визначеними на основі положень теорії формоутворення

Як показали виведені залежності, кількість зубів обкатної фрези з нерівномірним кроком зубів залежить від кількості зубів у групі оброблювальних відрізних пил, і зазвичай коливається від 2-х до 8-ми [33,76].

Фрези з великими окружними кроками і невеликою кількістю зубів мають більш міцні і масивні зуби, допускають більшу кількість переточувань, краще відводять тепло від різальних кромek, забезпечують краще розміщення стружки в канавках, дозволяють зрізувати більш товсті стружки, що сприяє зниженню зусиль, діючих на обкатну фрезу [73,75].

Кожен зуб обкатної фрези при взаємопов'язаних обертальних рухах фрези та заготовки пили, нарізує відповідну канавку зуба відрізної пили, яка має кутовий крок ε_i . Таким чином, кожен зуб обкатної фрези буде мати відповідний кутовий крок, який обчислюється за формулою:

$$\varepsilon_{\phi i} = \frac{\varepsilon_i \cdot Z}{Z_{gr}} \quad (3.12)$$

Наступний етап проектування включає розрахунок координат точок різальних кромek зубів обкатної фрези. Так як кожен зуб обкатної фрези формує певну стружкову канавку пили з нерівномірним кроком зубів в групі, координати базових точок A , B і C розраховуються для кожного зуба фрези.

Слід відзначити, що координати точок Y_{Bi} , X_{Ai} та X_{Bi} залежать від установки обкатної фрези по відношенню до осі пили.

Координати точок A і B визначаються за залежностями розділу 2 при установці осі обкатної фрези перпендикулярно до осі заготовки відрізної пили (2.7-2.9, 2.12-2.18) або при нахиленій установці осі (2.25-2.27, 2.30).

Тому при проектуванні дискових обкатних фрез розглядаємо загальний випадок її нахиленої установки під кутом β (2.45) зі зміщенням найбільшого зуба відносно осі пили з міжцентровою відстанню a (2.24).

Послідовність розрахунку координат базових точок різальної кромки обкатної фрези в системі координат $X_\phi Y_\phi Z_\phi$ обчислюється в послідовності, показаній на рисунку 3.6.

Точки $A(X_\phi Y_\phi Z_\phi)$ і $B(X_\phi Y_\phi Z_\phi)$ визначають прямолінійну різальну кромку обкатної фрези, що обробляє передню площину виробу, точки $B(X_\phi Y_\phi Z_\phi)$ і $C(X_\phi Y_\phi Z_\phi)$ визначають прямолінійну різальну кромку обкатної фрези, що обробляє потиличну площину виробу. Знаючи різальні кромки АВ та ВС згідно рекомендацій створюють на ній передній кут γ_ϕ і таким шляхом визначають положення передньої площини дискової обкатної фрези.

Також кожен зуб обкатної фрези характеризується різним значенням радіусів зубів фрези при переході від одного зуба до сусіднього $\Delta R_{\phi i}$ та зміщенням вершин зубів відносно вершини найбільшого зуба. Аналіз визначення цих величин показує, що зміщення радіуса вершин зубів $\Delta R_{\phi i}$, та зміщення вершин зубів $B_{\phi i}$, відповідно являють собою різницю координат Y_{Bi} між сусідніми зубами ($\Delta R_{\phi i} = Y_{B1} - Y_{Bi}$), та різницю координат між X_{Ai} та X_{Bi} ($B_{\phi i} = X_{Ai} - X_{Bi}$).

Після визначення профілю зубів обкатної фрези, призначаються геометричні параметри різальної частини, а саме передні та задні кути. Оптимальними величинами геометричних параметрів вважають такі, які забезпечують найвищу стійкість інструмента при певних умовах його експлуатації. Передній кут, як показують численні експерименті залежить, в основному, от властивостей оброблюваного матеріалу та матеріалу обкатної фрези. Згідно [11,106,111,113,114,119,123] відрізнi пили виготовляють із різних марок швидкорізальних сталей. Причому для обкатних фрез із швидкорізальних сталей передні кути в вершинній точці

рекомендується приймати $\gamma_6 = 5^\circ \div 10^\circ$ [39]. Оптимальні значення задніх кутів, в найбільшій мірі визначаються товщиною зрізу. Для чорнового нарізання зубів відрізних пил обкатними фрезами задній кут в вершинній точці приймаємо $\alpha_6 = 10^\circ$ [39].

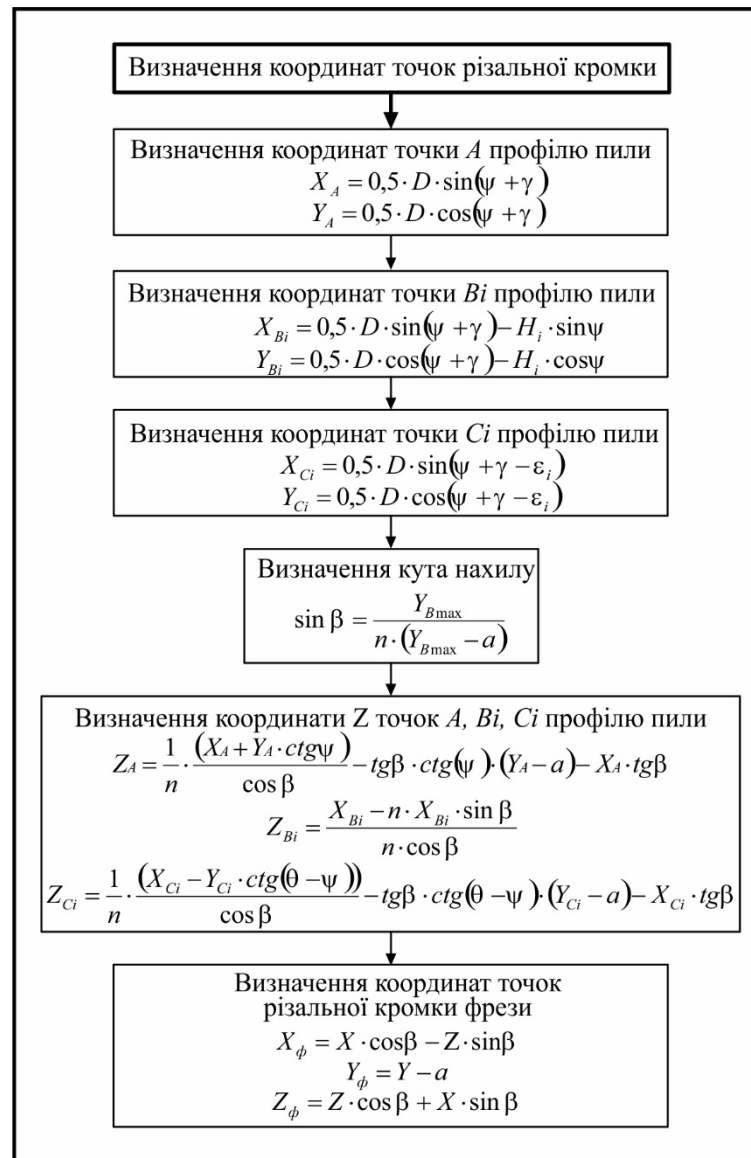


Рисунок 3.6 – Схема визначення координат базових точок різальних кромки зубів обкатної фрези

При проектуванні дискових обкатних фрез для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком основою є визначення конструктивних параметрів різальної частини цих фрез. При розробці їх конструкції крім параметрів різальної частини необхідно знати параметри установки та кріплення фрези

на оправці та товщини кожного елемента тіла фрези, які вибираються згідно нормативних документів або за рекомендаціями інших джерел.

3.3.2 Конструктивні параметри залежні від параметрів різальної частини

До параметрів залежних від конструкції різальної частини, які призначаються за рекомендаціями нормативних та інших джерел відносяться: посадковий діаметр фрези під оправку d_0 , товщина різального диску B_ϕ , діаметр ступиці D_{cm} та ширина ступиці B_{cm} , які визначаються в залежності від мінімального зовнішнього діаметра найбільшого по висоті зуба фрези D_ϕ .

Конструктивні параметри обкатних фрез призначались згідно «ГОСТ 10996-64. Фрезы дисковые зуборезные модульные. Технические условия». Для визначання розмірів ступиці та шпонкового пазу використовувались «ГОСТ 28527-90. Фрезы дисковые трехсторонние. Типы и размеры» (ИСО 2587-72), та «ГОСТ 9472-90. Крепление инструментов на оправках. Типы и Размеры». Конструктивні параметри дискової обкатної фрези, які залежать від її зовнішнього діаметра D_ϕ наведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Конструктивні параметри дискових обкатних фрез

Показник	Позначення	Розміри, мм					
Зовнішній діаметр	$D_\phi h16$	≤ 55	$>55 \div 80$	$>80 - 110$	$>110 - 140$	$>140 - 180$	> 180
Діаметр під оправку	$d_0 H7$	19	22	27	32	40	50
Товщина	$B_\phi h12$	$4 \div 5,5$	$5 \div 10$	$9 \div 20$	$17 \div 31$	$27 \div 47$	$42 \div 53$
Діаметр ступиці, не менш ніж	D_{cm}	27	34	41	47	55	65
Ширина ступиці	B_{cm}	$B+(0,2 \div 3) \text{ мм}$					
Висота шпонкового пазу	C_1	$21,1_0^{+0,1}$	$24,1_0^{+0,1}$	$29,8_0^{+0,2}$	$34,8_0^{+0,2}$	$43,5_0^{+0,2}$	$53,5_0^{+0,2}$
Ширина шпонкового пазу	A_1	5	6	7	8	10	12

Виходячи з рекомендованих діаметрів під оправку табл. 3.5 та розрахункового мінімального значення зовнішнього діаметра дискової обкатної фрези, якщо розрахункові значення зовнішнього діаметру менші за 50мм, то мінімальне допустиме рекомендоване значення зовнішнього діаметра необхідно брати рівним $D_{\phi min}=50$ мм.

Креслення обкатної фрези для обробки відрізної пили з числом зубів у групі $Z_{gr}=4$ та нерівномірністю $\Delta=30\%$ [33,43,76] показано на рисунку 3.7.

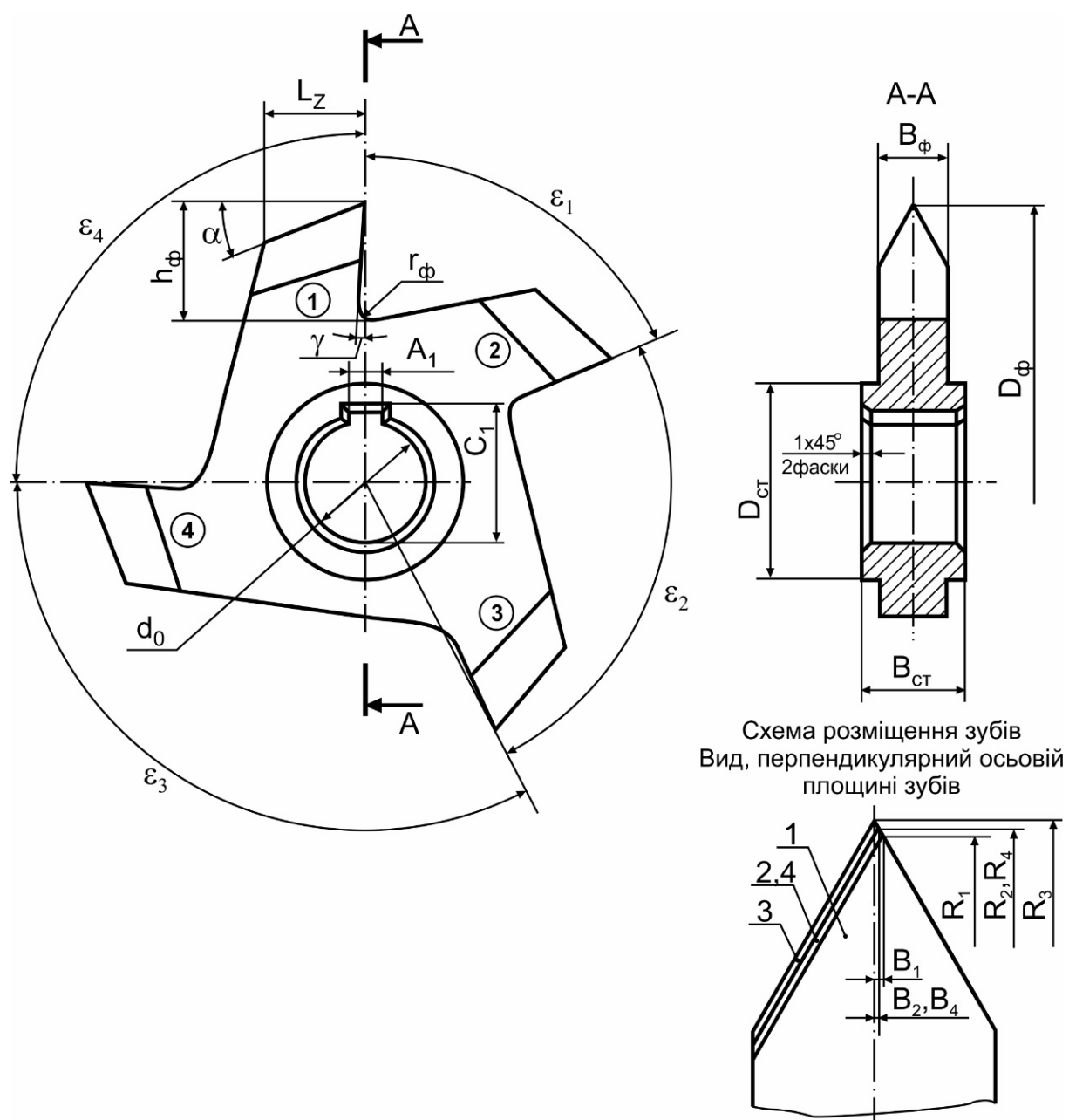


Рисунок 3.7 – Дискова обкатна фреза $Z_0=4$ [64]

Призначення геометричних параметрів в інструментальній системі координат не в повній мірі відображають дійсну картину величин геометричних параметрів в процесі різання. Створення ж прогресивних різальних інструментів і оцінка їх досконалості потребує визначення та аналізу зміни геометричних параметрів в статичній або кінематичній системах координат [19].

Оскільки величини геометричних параметрів на різальній частині вздовж різальної кромки не залишаються постійними [54,61], виникає задача їх визначення та дослідження зміни вздовж різальних кромок в процесі експлуатації дискових обкатних фрез.

Висновки

Верше на прикладі обробки відрізних пил з дрібним зубом розроблена дискова обкатна фреза для нарізання пил з нерівномірним кроком зубів.

Вперше на основі мінімально розрахункового діаметра та допустимої висоти зуба обґрунтована кількість допустимих переточувань та визначений зовнішній діаметр фрези з їх урахуванням.

Вперше досліджені радіуси перехідних кривих. Показано, що на розміри перехідних кривих впливають параметри різальної частини відрізної пили з нерівномірним кроком.

Показано, що визначення радіуса кожного зуба обкатної фрези $R_{\phi i}$ залежить від кутового кроку ε_i зубів пили та зміщення вершин фрези.

РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РІЗАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ ДИСКОВОЇ ОБКАТНОЇ ФРЕЗИ В ПРОЦЕСІ ЇЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

4.1 Загальні положення методики визначення геометрії різальної частини обкатних фрез в процесі обробки

Висока продуктивність та точність виготовлення відрізних пил з нерівномірним кроком в великій мірі залежить від вибору геометричних параметрів обкатної фрези. Їх вихідні значення проставляються на кресленні, тобто в інструментальній системі координат, за якими здійснюють виготовлення та контроль різальної частини фрези.

Відомо [54,61,75], що в процесі роботи інструменту геометричні параметри вздовж його різальної кромки змінюються. Тому, щоб розробляти прогресивні конструкції інструментів необхідно знати від яких вихідних даних залежать величини геометричних параметрів в різних точках різальної кромки і яким чином забезпечити їх доцільні величини в процесі експлуатації.

Геометричні параметри різальної частини інструменту залежать від форми його передніх, задніх поверхонь та рухів, що здійснюються в процесі обробки інструментом щодо заготовки [54,61,75].

Згідно за ДСТУ 2249-93 «Обробка різанням. Терміни, визначення та позначення» значення геометричних параметрів вздовж різальної кромки в процесі різання визначають в статичній та в кінематичній системах координат (статичні та кінематичні параметри).

При невеликих значеннях подачі, коли різниця між статичними та кінематичними параметрами не перевищує заданий на них допуск, то цією різницею нехтують, а геометричні параметри визначають в статичній системі координат.

Аналізуючи зміну параметрів вздовж різальних кроком та порівнюючи з рекомендованими визначають шляхи удосконалення інструмента з метою підвищення їх працездатності.

Першочерговою задачею при аналізі геометрії вздовж різальних кромок інструмента, є визначення в різних системах координат переднього і заднього кутів.

В будь-якій системі передній кут вимірюється в головній січній площині P_τ між передньою поверхню леза та основною площиною P_v , а задній – в цій же площині між задньою поверхню та площиною різання P_n . Площина різання за визначенням [19] перпендикулярна основній площині. Знаючи положення площини різання P_n в тій чи іншій системі координат можна визначити значення переднього та заднього кутів в відповідній системі.

Знаючи положення площини різання P_n в тій чи іншій системах координат можна визначити значення переднього γ і заднього α кутів в відповідній системі.

Відмінність положення площини різання в різних координатних системах характеризується кутом τ . Цій же кут (τ) і визначає різницю між значеннями кутів γ і α в різних системах.

Відомо, що положення будь якої площини однозначно визначається нормаллю до неї. Так кут τ між кінематичною P_{nk} та статичною P_{nc} площинами різання розраховується залежністю [61]:

$$\cos \tau_{nk} = \frac{(\bar{N}_{nk} \cdot \bar{N}_{nc})}{|\bar{N}_{nk}| \cdot |\bar{N}_{nc}|} \quad (4.1)$$

Таким чином, виникає задача визначення нормалей до поверхні різання в статичній і кінематичній системах координат. Для їх визначення розглянемо, які рухи здійснює обкатна фреза відносно оброблюваної заготовки пили.

Незалежно від положення осі обкатної фрези по відношенню до осі пили, фреза і пила здійснюють обертальні рухи.

Взагалі, незалежно від конструкції інструменту, знаючи форму різальної кромки та швидкість руху в будь-якій точці різальної кромки, може бути визначена площина різання, як елементарна поверхня різання, що здійснюється цією точкою різальної кромки в певний момент часу [61]. Нормаль до будь-якої поверхні визначається швидкістю різання та дотичною до різальної кромки \overline{P} [61].

Тоді нормаль до статичної площини різання буде:

$$\overline{N}_{nc} = [\overline{P} \times \overline{V}]$$

$$\overline{N}_{nc} = [\overline{P} \cdot \overline{V}] = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ P_X & P_Y & P_Z \\ V_X & V_Y & V_Z \end{vmatrix} = \bar{i} \cdot (P_Y \cdot V_Z - P_Z \cdot V_Y) - \bar{j} \cdot (P_X \cdot V_Z - P_Z \cdot V_X) +$$

$$+ \bar{k} \cdot (P_X \cdot V_Y - P_Y \cdot V_X) = \bar{i} \cdot N_{ncX} + \bar{j} \cdot N_{ncY} + \bar{k} \cdot N_{ncZ} \quad (4.2)$$

Нормаль до кінематичної площини різання буде:

$$\overline{N}_{nk} = [\overline{P} \times \overline{V}_e]$$

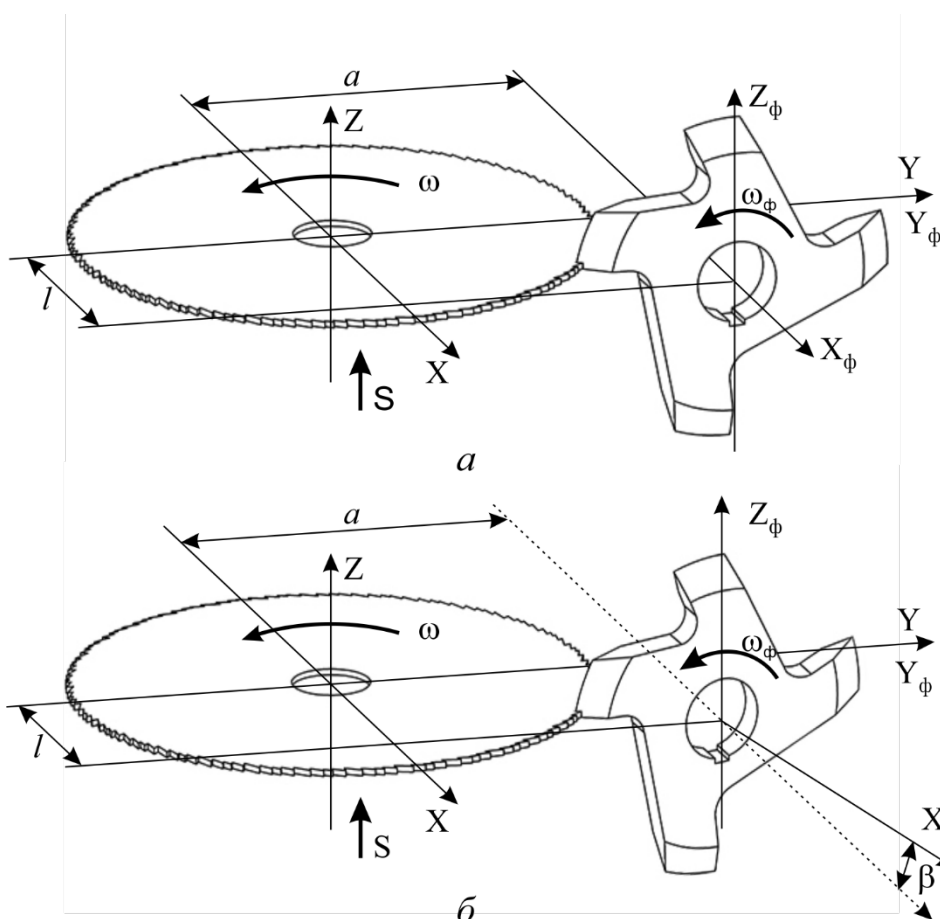
$$\overline{N}_{nk} = [\overline{P} \cdot \overline{V}_e] = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ P_X & P_Y & P_Z \\ V_{eX} & V_{eY} & V_{eZ} \end{vmatrix} = \bar{i} \cdot (P_Y \cdot V_{eZ} - P_Z \cdot V_{eY}) - \bar{j} \cdot (P_X \cdot V_{eZ} - P_Z \cdot V_{eX}) +$$

$$+ \bar{k} \cdot (P_X \cdot V_{eY} - P_Y \cdot V_{eX}) = \bar{i} \cdot N_{nkX} + \bar{j} \cdot N_{nkY} + \bar{k} \cdot N_{nkZ} \quad (4.3)$$

Таким чином, для визначення \overline{N}_{nc} та \overline{N}_{nk} необхідно визначити швидкості головного та результуючого рухів різання [61].

Схема рухів обкатної фрези при нарізанні дискових пил наведена на рис. 4.1.

За головний рух приймається обертальний рух обкатної фрези. Результуючий рух визначається сумою векторів головного руху та руху подачі. При обкатці рух подачі являє собою складний рух, який включає безпосередньо осьову подачу заготовки та обкатний обертальний рух.



а – вісь обкатної фрези перпендикулярна до осі відрізної пили;
 б – вісь обкатної фрези нахилена до осі відрізної пили під кутом β .

Рисунок 4.1 – Схема рухів обкатної фрези та заготовки пили

За один оберт дискової обкатної фрези здійснюється нарізання в межах одного проходу однієї групи зубів.

Кількість обертів фрези при нарізанні зубів пили залежить від кількості груп на заготовці з нерівномірним кроком:

$$n = \frac{Z}{Z_{gr}} \quad (4.4)$$

$Z_{gr} = Z_0$ - кількість зубів дискової обкатної фрези;

Z - кількість зубів відрізної пили.

Слід відзначити, що складний рух подачі обкатного інструменту в загальному вигляді визначається за залежністю:

$$\overline{V_s} = \overline{S} + \overline{V_{об}} \quad (4.5)$$

де \overline{S} - осьова подача;

$\overline{V_{об}}$ - обертальний рух виробу.

З тією ж загальною кількістю зубів відрізної пили та осьовий подачі, зі зменшенням кількості зубів в групі відрізної пили, величина складного руху подачі порівняно збільшується.

Розглянемо визначення результуючого руху різання обкатного інструменту [22,30,61].

4.1.1 Визначення результуючого руху різання дискової обкатної фрези

При роботі дискової обкатної фрези головний рух обертання фрези і обертальний рух заготовки кінематично пов'язані один з одним передавальним відношенням U кутових швидкостей, що записується:

$$\frac{\omega_{\phi}}{\omega} = \frac{Z}{Z_0} = U \quad (4.6)$$

де ω – кутова швидкість обертання відрізної пили;

ω_{ϕ} – кутова швидкість обертання дискової обкатної фрези;

Z_0 – кількість зубів дискової обкатної фрези;

Z – кількість зубів відрізної пили.

При аналізі геометричних параметрів різальної частини інструменту необхідно знати напрям вектора швидкості різання в досліджуваній точці різальної кромки [55,65].

При визначенні вектору швидкості головного руху розглянемо 2 системи координат (рис. 4.2):

- $X_{\phi}Y_{\phi}Z_{\phi}$ – система координат пов'язана з дисковою обкатною фрезою, вісь X_{ϕ} співпадає з віссю шпинделя верстата;

- XYZ – система координат пов'язана з заготовкою пили, вісь Z співпадає з її віссю.

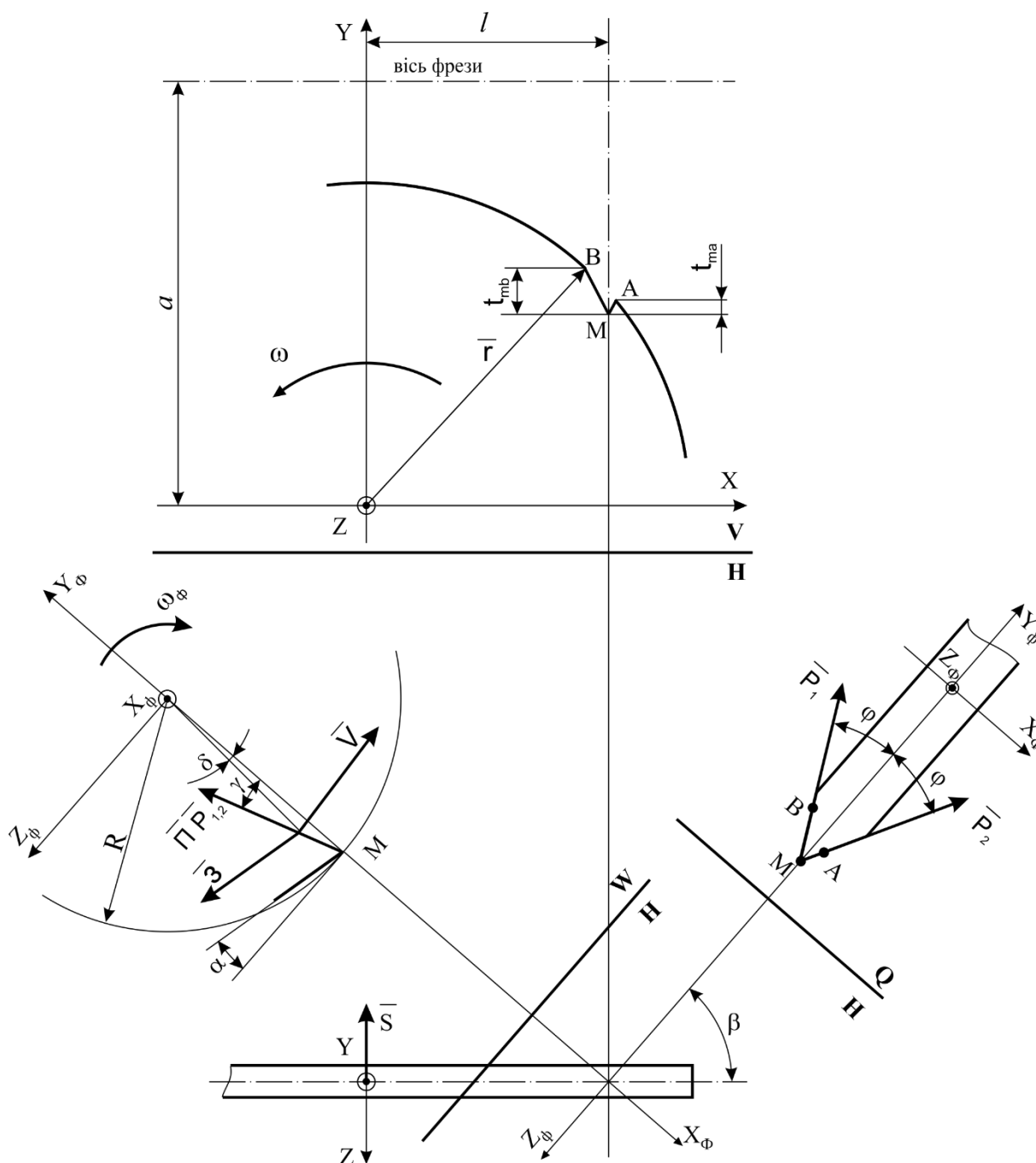


Рисунок 4.2 - Схема визначення результуючого руху різання дискової обкатної фрези

Як що прийняти за одиницю вектор швидкості обертання дискової обкатної фрези навколо своєї осі – головного руху, тоді кутову швидкість головного руху обертання будь-якої точки різальної кромки дискової обкатної фрези навколо своєї осі можна записати у вигляді:

$$\overline{\omega_\phi} = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \quad (4.7)$$

Головний рух різання буде:

$$\bar{V} = [\omega_{\phi} \times R_M] \quad (4.8)$$

R_M - радіус-вектор будь якої досліджуваної точки M різальної кромки обкатної фрези в системі $X_{\phi}Y_{\phi}Z_{\phi}$.

Для визначення швидкості головного руху, треба визначити радіус вектор будь-якої точки різальної кромки в системі $X_{\phi}Y_{\phi}Z_{\phi}$.

Координати точок в системі $X_{\phi}Y_{\phi}Z_{\phi}$, пов'язаною з дисковою обкатною фрезою згідно з (рис.4.3) запишемо наступним чином:

$$\begin{aligned} X_{\phi} &= \pm t_{BM} \cdot \sin \varphi \\ Y_{\phi} &= -R_{\phi i} + t_{BM} \\ Z_{\phi} &= \pm t_{BM} \cdot \sin \gamma \end{aligned} \quad (4.9)$$

де t_{BM} - відстань між вершиною зуба дискової обкатної фрези та будь-якою точкою M різальної кромки;

$R_{\phi i}$ - радіус вершини досліджуваного зуба дискової обкатної фрези.

Знаки \pm при визначенні координати X_{ϕ} описують праву та ліву різальну кромку зуба обкатної фрези. Знаки \pm при визначенні координати Z_{ϕ} описують вхід в тіло заготовки (+) та вихід з неї (-) зуба обкатної фрези при нарізанні зубів відрізної пили. Положення зуба обкатної фрези в момент повного врізання в тіло відрізної пили BM показано пунктиром.

З трикутника BMO (рис.4.3) кут δ_M , який визначає положення досліджуваної точки M різальної кромки, буде дорівнювати:

$$\tan \delta_M = \frac{t_{BM} \cdot \sin \gamma}{(R_{\phi} - t_{BM}) \cdot \cos \gamma}$$

Розмір e та кут δ_B , які визначають положення вершинної точки B зуба обкатної фрези в момент входу в тіло заготовки та виходу з неї при обробці відрізної пили визначаються за залежностями:

$$e = \frac{B/2}{\sin \beta}; \quad \sin \delta_B = \frac{e}{R_{\phi i}}$$

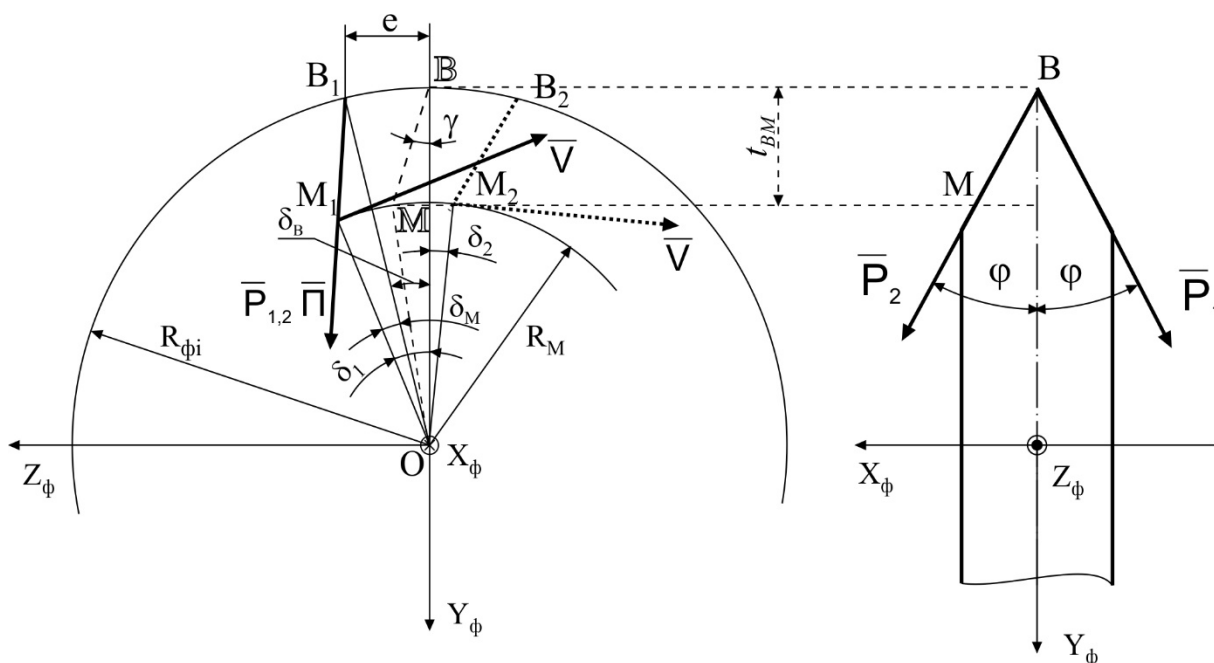


Рисунок 4.3 – Розрахункова схема для визначення вектора швидкості головного руху і радіуса будь-якої точки різальної кромки

Таким чином, кут δ_1 (рис.4.3), який характеризує положення будь якої досліджуваної точки різальної кромки M зуба обкатної фрези в момент входу в тіло заготовки при обробці відрізної пили визначається за залежністю:

$$\delta_1 = \delta_B + \delta_M$$

В момент виходу з тіла відрізної пили кут δ_2 буде:

$$\delta_2 = \delta_B - \delta_M$$

Одиничний вектор швидкості головного руху буде дорівнювати:

$$\bar{V} = \begin{vmatrix} 0 \\ \pm \sin \delta \\ -\cos \delta \end{vmatrix} \quad (4.10)$$

Кут δ дорівнює куту δ_1 при розрахунку швидкості головного руху при вході різальної кромки в тіло заготовки та її при виході - δ_2 .

Радіус-вектор будь-якої точки ріжучої кромки M обкатної фрези в системі $X_\phi Y_\phi Z_\phi$ запишеться:

$$R_M = \sqrt{(t_{BM} \cdot \sin \gamma)^2 + (-R_\phi + t_{BM})^2} \quad (4.11)$$

Таким чином вектор швидкості головного руху будь-якої точки різальної кромки з урахуванням залежностей (4.7, 4.8 та 4.11) буде:

$$\overline{V} = \begin{vmatrix} 0 \\ \pm \sin \delta \cdot \sqrt{(t_{BM} \cdot \sin \gamma)^2 + (-R_\phi + t_{BM})^2} \\ -\cos \delta \cdot \sqrt{(t_{BM} \cdot \sin \gamma)^2 + (-R_\phi + t_{BM})^2} \end{vmatrix} \quad (4.12)$$

Розглянемо рух подачі, який складається з осьової подачі заготовки та обкатного обертального руху.

Враховуючи кінематику нарізання зубів пили, матеріал обкатної фрези, згідно з рекомендаціями [97] осьовий рух подачі вибирається в межах $S=0,2 \div 0,4$ мм/об. Швидкість різання при цьому становить $20 \div 25$ м/хв.

Зважаючи на те, що за один оберт обкатної фрези надрізається певна кількість зубів в групі з нерівномірним кроком, яке дорівнює кількості зубів дискової обкатної фрези Z_0 , то середнє значення осьової подачі на зуб буде залежати від Z_0 . Так при значенні: $Z_0=4$ середнє значення подачі на зуб $S_z=0,05$ мм/зуб, при $Z_0=6$ - $S_z=0,033$ мм/зуб і при $Z_0=8$ - $S_z=0,0325$ мм/зуб, яку при визначенні руху подачі із-за її малого значення можна не враховувати.

Кутову швидкість руху подачі обертання будь-якої точки ріжучої кромки дискової обкатної фрези навколо осі відрізної пили можна записати у вигляді:

$$\overline{\omega} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ -\frac{1}{U} \end{vmatrix} \quad (4.13)$$

Вектор швидкості обкатного обертального руху подачі відрізної пили буде дорівнювати:

$$\overline{V_{o\phi}} = [\omega \times r_i] \quad (4.14)$$

де r_i – радіус-вектор досліджуваної точки профілю зуба відрізної пили в системі $X_\phi Y_\phi Z_\phi$.

Для визначення радіуса вектора будь-якої точки різальної кромки в системі $X_\phi Y_\phi Z_\phi$, запишемо зв'язок між системами координат згідно рис.4.3 наступним чином:

$$\begin{aligned} X &= X_\phi \cdot \cos \beta + l \\ Y &= Y_\phi + a \\ Z &= Z_\phi \cdot \sin(90^\circ - \beta) \end{aligned} \quad (4.15)$$

де β - кут нахилу осі дискової обкатної фрези до осі відрізної пили, який визначається за залежністю (2.33);

a - відстань між осями обкатної фрези та заготовки пили, розраховується за залежністю (3.14) для найбільшого зуба обкатної фрези;

l - зміщення осі дискової обкатної фрези від осі відрізної пили, яке забезпечує отримання заданого переднього кута зуба відрізної пили, та розраховується за залежністю (3.13) для найбільшого зуба обкатної фрези.

Тоді координати радіуса-вектора r_i в системі $X_\phi Y_\phi Z_\phi$ запишуться наступним чином:

$$\overline{r}_i = \begin{pmatrix} \pm t_{BM} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \beta + l \\ -R_\phi + t_{BM} + a \\ \pm t_{BM} \cdot \sin \gamma \cdot \sin(90^\circ - \beta) \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

Тоді вектор швидкості подачі з урахуванням (4.13, 4.14, та 4.16) буде:

$$\overline{V}_{об}(V_s) = \begin{pmatrix} \pm t_{BM} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \beta + l \\ -R_\phi + t_{BM} + a \\ -t_{BM} \sin \gamma \cdot \sin(90^\circ - \beta) \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{U} \quad (4.17)$$

Тоді швидкість результуючого руху різання \overline{V}_e записується як:

$$\overline{V}_e = \overline{V} + \overline{V}_s \quad (4.18)$$

де \overline{V} - вектор швидкості головного руху обертання дискової обкатної фрези навколо своєї осі, визначається за залежністю (4.12);

\overline{V}_s - вектор швидкості подачі, який визначається згідно (4.5 та 4.18).

Визначивши вектор головного руху \overline{V} та результуючого руху різання \overline{V}_e розраховуються кінематичні геометричні параметри різальної частини дискової обкатної фрези в досліджуваних точках різальних кромки.

4.1.2 Визначення кінематичного кута в плані

Працездатність інструменту в значній мірі залежить від значень кута в плані φ . Активна довжина різальної кромки, товщина зрізу, величина і напрям рівнодіючої зусилля різання, також залежить від кута в плані φ .

Із зменшенням кута в плані стійкість інструменту і продуктивність обробки підвищується головним чином із-за зменшення товщини зрізу [35,71,61,95]. Проте зменшення кутів в плані також приводить до збільшення радіальної складової зусилля різання, внаслідок чого зростає небезпека виникнення вібрацій при обробці. Тому при конструюванні різальних інструментів потрібно вибирати доцільні значення величини кутів в плані φ , що забезпечують обробку без низькочастотних вібрацій. Слід також враховувати, що через зростання радіальної сили різання при зменшенні кутів в плані відповідно знижується точність обробки.

За визначенням ДСТУ 2249-93 кут у плані φ - це кут в основній площині між площиною різання P_n і робочою площиною P_s . Відповідно до координатної площини розглядають φ_i , φ_c та φ_k .

Кінематичний кут в плані в загальному вигляді визначається за формулою [61]:

$$\cos \varphi_k = \frac{(\overline{N}_{нк} \cdot \overline{N}_s)}{|\overline{N}_{нк}| \cdot |\overline{N}_s|} \quad (4.19)$$

де - $\overline{N}_{нк}$ нормаль до кінематичної площини різання, яка визначається за залежністю (4.3).

Положення робочої площини визначається вектором її нормалі, який буде:

$$\overline{N}_s = [\overline{P} \times \overline{V}_s] \quad (4.20)$$

де \overline{V}_s – вектор руху подачі, який розраховується за формулою (4.5).

У загальному випадку вектор \overline{P} , дотичний до різальної кромки буде:

$$\overline{P} = \overline{i} \cdot P_x + \overline{j} \cdot P_y + \overline{k} \cdot P_z, \quad (4.21)$$

Вектор \overline{P}_1 направимо по правій різальній кромці, вектор \overline{P}_2 направимо по лівій різальній кромці (рис.4.3).

При вході зуба фрези в тіло заготовки вектор \overline{P}_1 і \overline{P}_2 запишемо:

$$\begin{aligned} \overline{P}_1 &= -\overline{i} \cdot \sin \varphi + \overline{j} \cdot \cos \varphi + \overline{k} \cdot \cos \varphi \cdot \tan(\gamma - \delta_1) \\ \overline{P}_2 &= \overline{i} \cdot \sin \varphi + \overline{j} \cdot \cos \varphi + \overline{k} \cdot \cos \varphi \cdot \tan(\gamma - \delta)_1 \end{aligned} \quad (4.22)$$

При виході зуба фрези з тіла заготовки вектор \overline{P}_1 і \overline{P}_2 запишемо

$$\begin{aligned} \overline{P}_1 &= -\overline{i} \cdot \sin \varphi + \overline{j} \cdot \cos \varphi + \overline{k} \cdot \cos \varphi \cdot \tan(\gamma - \delta_2) \\ \overline{P}_2 &= \overline{i} \cdot \sin \varphi + \overline{j} \cdot \cos \varphi + \overline{k} \cdot \cos \varphi \cdot \tan(\gamma - \delta_2) \end{aligned} \quad (4.23)$$

Таким чином, знаючи нормалі $\overline{N}_{нк}$ та \overline{N}_s можемо визначити кінематичний кут в плані будь-якої точки різальної кромки дискової обкатної фрези.

4.1.3 Визначення кінематичного переднього кута зуба фрези

Так як передній кут γ за визначенням знаходиться між передньою поверхнею та основною площиною, яка перпендикулярна до площини різання, то кут між нормаллю до передньої поверхні \overline{N}_Π і нормаллю до площини різання буде рівний $90-\gamma$. [61]. Кінематичний головний передній кут γ вимірюється у кінематичній головній січній площині [19]. Відповідно до цього визначається нормаль $\overline{N}_{нк}$ до кінематичної площини різання.

Кінематичний передній кут γ_k буде [61,75]:

$$\operatorname{tg} \gamma_k = \frac{\overline{N}_{нк} \cdot \overline{N}_\Pi}{|\overline{N}_{нк} \times \overline{N}_\Pi|} \quad (4.24)$$

Вектор $\bar{N}_{нк}$ нормалі до кінематичної площини різання визначається за залежністю (4.3).

Положення передньої поверхні визначається вектором \bar{P} , спрямованим по різальній кромці і вектором $\bar{\Pi}$, розташованими в передній площині [61].

Вектор нормалі \bar{N}_{Π} до передньої поверхні буде:

$$\bar{N}_{\Pi} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ P_x & P_y & P_z \\ \Pi_x & \Pi_y & \Pi_z \end{vmatrix} = \bar{i} \cdot (P_y \cdot \Pi_z - P_z \cdot \Pi_y) - \bar{j} \cdot (P_x \cdot \Pi_z - P_z \cdot \Pi_x) + \bar{k} \cdot (P_x \cdot \Pi_y - P_y \cdot \Pi_x) = \bar{i} \cdot N_{\Pi x} + \bar{j} \cdot N_{\Pi y} + \bar{k} \cdot N_{\Pi z} \quad (4.25)$$

Положення вектора $\bar{\Pi}$ залежить від форми заданої передньої поверхні. В загальному випадку в кожній точці він дорівнює:

$$\bar{\Pi} = \bar{i} \cdot \Pi_x + \bar{j} \cdot \Pi_y + \bar{k} \cdot \Pi_z. \quad (4.26)$$

При вході зуба фрези в тіло заготовки та його виході вектор до передньої поверхні запишемо таким чином (рис. 4.3):

$$\begin{aligned} \bar{\Pi} &= \bar{j} \cdot \cos \gamma + \bar{k} \cdot \sin(\gamma - \delta_1) \\ \bar{\Pi} &= \bar{j} \cdot \cos \gamma + \bar{k} \cdot \sin(\gamma - \delta_2) \end{aligned} \quad (4.27)$$

Кінематичний передній кут $90 - \gamma_k$ між нормаллю $\bar{N}_{нк}$ до площини різання і нормаллю \bar{N}_{Π} до передньої поверхні може бути визначена також по формулі [61]:

$$\cos(90 - \gamma_k) = \sin \gamma_k = \frac{(\bar{N}_{нк} \cdot \bar{N}_{\Pi})}{|\bar{N}_{нк}| \cdot |\bar{N}_{\Pi}|} \quad (4.28)$$

Відповідно до цього згідно (4.24) або (4.28) можна визначити кінематичний передній кут γ_k будь-якої точки різальної кромки дискової обкатної фрези.

4.1.4 Визначення кінематичного заднього кута зуба фрези

Задній кут α це кут в січній площині між площиною, дотичної до задньої поверхні в досліджуваній точці різальної кромки і площиною різання [19].

Будемо вважати відомим задній кут у вершинній точці різальної кромки.

Кут між нормаллю \bar{N}_n до площини різання і нормаллю \bar{N}_3 до задньої поверхні, в досліджуваній точці різальної кромки, буде рівний задньому куту α_n в нормальному перетині [61].

Відповідно до цього задній кут α_k буде дорівнювати:

$$\cos \alpha_k = \frac{(\bar{N}_{nk} \cdot \bar{N}_3)}{|\bar{N}_{nk}| \cdot |\bar{N}_3|} \quad (4.29)$$

Вектор \bar{N}_{nk} нормалі до кінематичної площини різання визначається за залежністю (4.3).

Положення задньої поверхні визначається вектором \bar{P} і вектором \bar{Z} , розташованим на задній поверхні (рис.4.2).

В системі $X_\phi Y_\phi Z_\phi$ вектори \bar{P}_1 і \bar{P}_2 розраховуються за залежностями (4.22) і (4.23).

В системі $X_\phi Y_\phi Z_\phi$ у загальному випадку вектор \bar{Z} записується таким чином [61]:

$$\bar{Z} = \bar{i} \cdot Z_x + \bar{j} \cdot Z_y + \bar{k} \cdot Z_z \quad (4.30)$$

При вході зуба фрези в тіло заготовки та його виході вектор \bar{Z} буде:

$$\begin{aligned} \bar{Z} &= \bar{j} \cdot \sin(90 - \alpha - \delta_1) + \bar{k} \cdot \cos(90 - \alpha - \delta_1) \\ \bar{Z} &= \bar{j} \cdot \sin(90 - \alpha - \delta_2) + \bar{k} \cdot \cos(90 - \alpha - \delta_2) \end{aligned} \quad (4.31)$$

Вектор нормалі \bar{N}_3 до задньої поверхні буде:

$$\bar{N}_3 = [\bar{P} \times \bar{Z}] = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ P_x & P_y & P_z \\ Z_x & Z_y & Z_z \end{vmatrix} = i(P_y Z_z - P_z Z_y) - j(P_x Z_z - P_z Z_x) - k(P_x Z_y - P_y Z_x); \quad (4.32)$$

$$\bar{N}_3 = \bar{i}N_{3x} + \bar{j}N_{3y} + \bar{k}N_{3z}. \quad (4.33)$$

Кінематичний задній кут α_k може бути визначено також за залежністю [61]:

$$\operatorname{tg} \alpha_k = \frac{[\bar{N}_{nk} \times \bar{N}_3]}{(\bar{N}_{nk} \cdot \bar{N}_3)} \quad (4.34)$$

Таким чином, згідно (4.29) або (4.34) можна визначити кінематичний задній кут α_k будь-якої точки різальної кромки дискової обкатної фрези.

4.1.5 Визначення кінематичного кута нахилу різальної кромки зуба фрези

Визначимо кут λ нахилу різальної кромки. За визначенням кут λ вимірюється в площині різання і розміщений між різальною кромкою і основною площиною, тобто між вектором \bar{P} перпендикулярним до різальної кромки і вектором швидкості результуючого руху різання \bar{V}_e [19,61]. Отже

$$\sin \lambda_k = \frac{(\bar{V}_e \cdot \bar{P})}{|\bar{V}_e| \cdot |\bar{P}|} \quad (4.35)$$

В системі $X_\phi Y_\phi Z_\phi$ вектори \bar{P}_1 і \bar{P}_2 розраховуються за залежностями (4.22) і (4.23).

Вектор швидкості результуючого руху різання \bar{V}_e розраховуємо за залежністю (4.18).

За визначеними залежностями проведемо дослідження зміни геометричних параметрів різальної частини зуба дискової обкатної фрези в процесі її експлуатації.

4.2 Дослідження геометрії передньої і задньої поверхонь різальної частини зубів дискової обкатної фрези

Геометрія передньої та задньої поверхні в процесі роботи дискової обкатної фрези характеризується кутом в плані φ , переднім кутом γ , заднім кутом α та кутом нахилу різальних кромок λ .

За наведеними залежностями було розраховано та проведено аналіз геометрії різальної частини обкатних дискових фрез з нерівномірним кроком зубів в кінематичній системі координат.

Передні кути γ відрізних пил, згідно «ISO 2296-72. Пилы дисковые по металлу с мелким и крупным зубом», можуть бути 0° , 5° , 10° . Дослідження геометрії передньої та задньої поверхні в процесі роботи дискової обкатної фрези проводилися на прикладі відрізних пил з $\gamma=5^\circ$ та $\gamma=10^\circ$.

При розрахунку геометричних параметрів на різальних кромках зубів дискової обкатної фрези було розглянуто положення кожного її зуба з $\gamma_e = 6^\circ$ та $\alpha_e = 10^\circ$ в момент повного врізання в заготовку при обробці відрізних пил за наступними параметрами: $Z_{gr}=4$, та $Z_{gr}=6$, $Z=48 \div 200$.

Досліджувались зміни кутів на різальних кромках: правій MK , яка обробляє передню поверхню відрізної пили та лівій ML , що обробляє потиличну (рис. 5). В якості базових точок на різальній кромці розглядалися вершинна точка M , та дві граничні точки – точка K та L . За допомогою програми для математичних і інженерних обчислень MathCad та програми Microsoft Excel за виведеними залежностями були розраховані та побудовані графіки зміни геометричних параметрів різальної частини зубів обкатної фрези від параметрів оброблюваної відрізної пили і епюри їх зміни вздовж різальних кромок зубів фрези [25,36].



Рисунок 4.6 – Профілюючі ділянки різальних кромek дискової обкатної фрези

Особливості профілю кожного зуба дискової обкатної фрези такі, що при розподіленні нерівномірності кроків у групі в відповідності до закону трикутника, для нарізання відрізної пили з кількістю зубів у групі $Z_{gr}=4$ профілі другого та четвертого зубів мають однакові розміри, а для нарізання відрізної пили з кількістю зубів $Z_{gr}=6$ профілі другого та третього зубів мають однакові розміри з профілем п'ятого та шостого.

Згідно залежності (4.19) з урахуванням (4.3, 4.5, 4.20, 4.22, 4.23), які були введені в програму MathCad, обчислені зміни величини кутів в плані φ в вершинній точці різальних кромek на найбільшому зубі обкатної фрези, а також їх зміни вздовж профілюючих ділянок різальних кромek кожного зуба фрези в залежності від параметрів оброблювальної відрізної пили. На рис. 4.7 показано характер зміни кута в плані φ в процесі роботи обкатної фрези на першому найбільшому її в залежності від кількості зубів, та переднього кута оброблювальної відрізної пили.

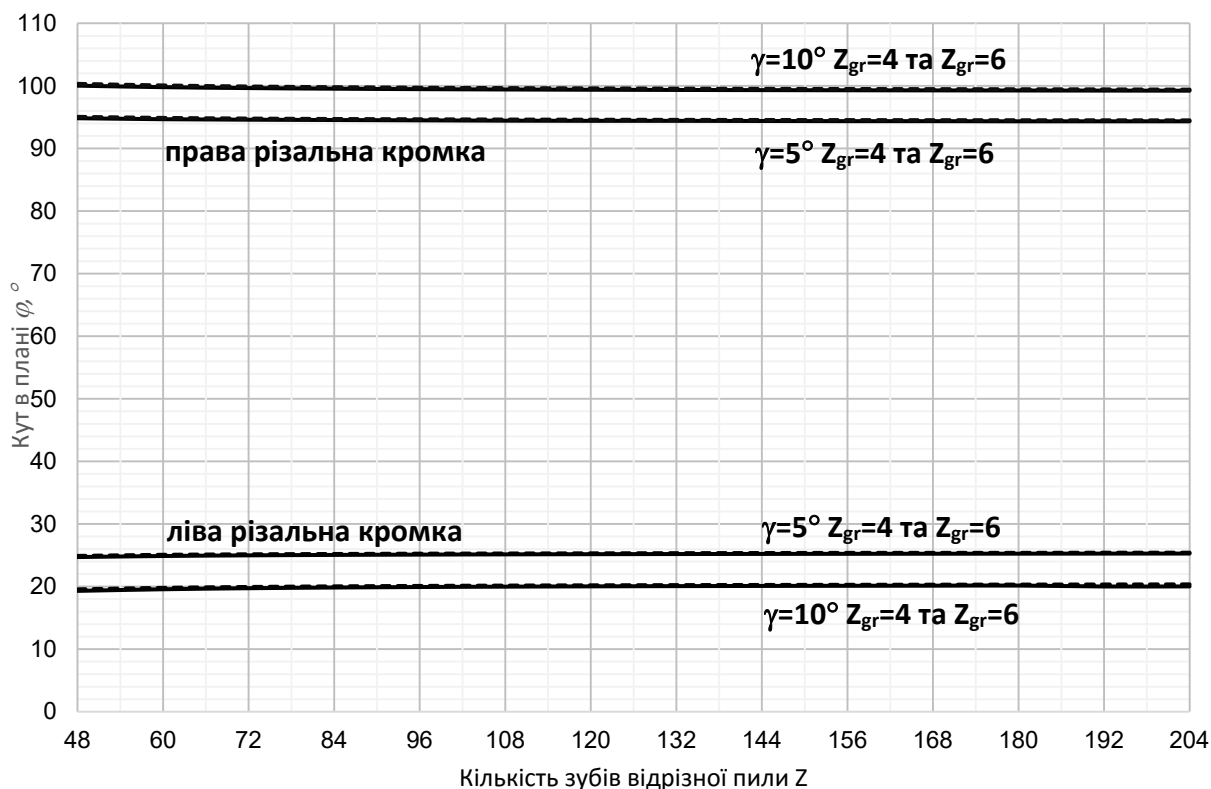
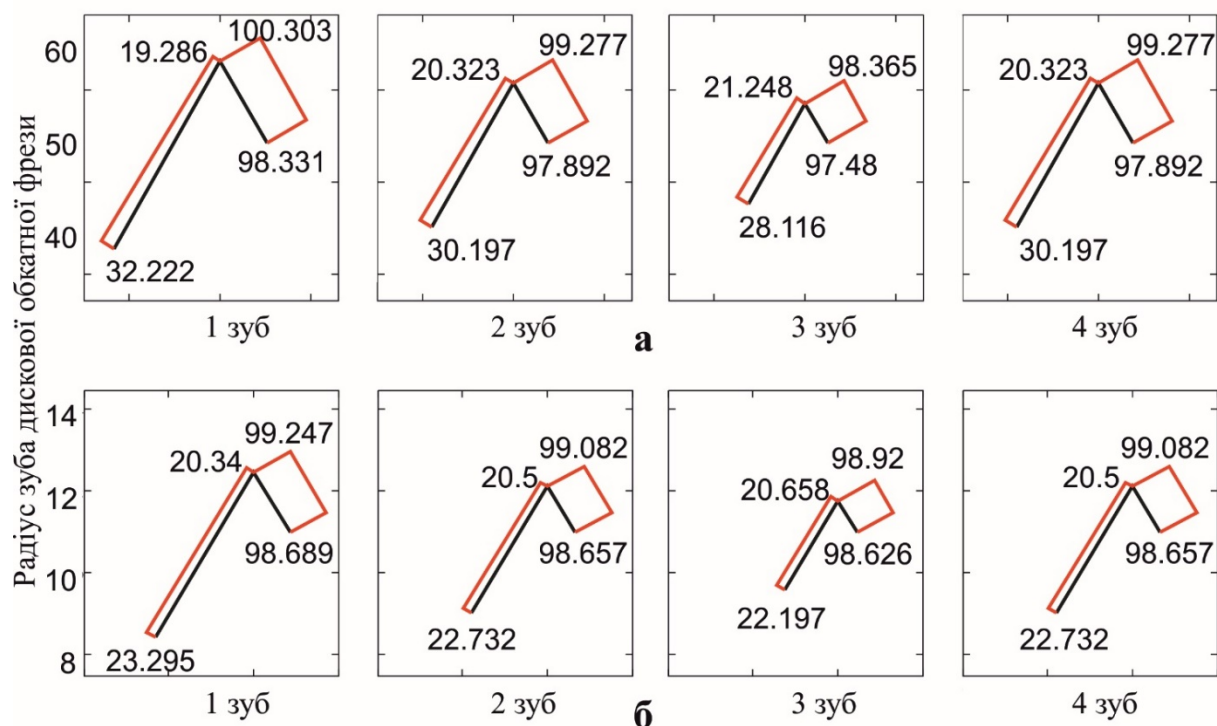


Рисунок 4.7 – Характер зміни кута плані $\varphi, ^\circ$ в вершинній точці M різальних кромки на найбільшому зубі обкатної фрези в залежності від кількості зубів відрізної пили

На рис. 4.8 показані епюри зміни кутів в плані зубів дискової обкатної фрези вздовж різальних кромки при $\varnothing 250\text{мм}$, $Z_{gr}=4$, числі зубів $Z=40$, та $Z=200$ та задньому куті $\gamma=10^\circ$ оброблювальної відрізної пили.

З отриманих результатів кінематичний кут в плані від зуба до зуба на одній різальній кромки збільшується, на другій зменшується. Більш різкі зміни кінематичного кута в плані відбувається при збільшенні кількості зубів в групі, але все одно ці зміни дуже незначні.

За результатами аналізу епюр згідно рис. 4.8 одна з різальних кромки (позначена як MK на рис.4.6) бере участь в процесі різання більш активно (більші значення кута φ) і буде зрізати більше матеріалу при обробці канавки зуба пили ніж друга різальна кромка.



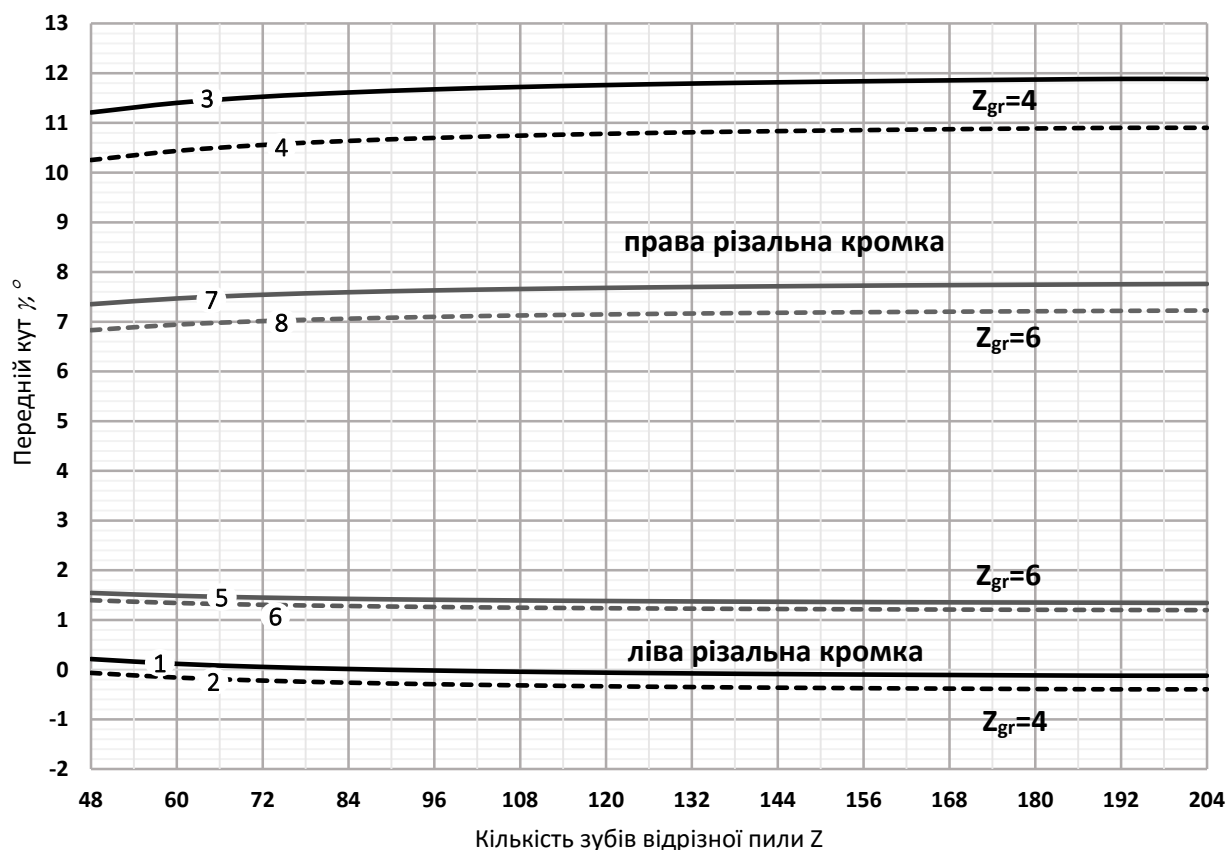
а - $Z=40, \gamma=10^\circ$; б - $Z=200, \gamma=10^\circ$.

Рисунок 4.8 – Епюри зміни кута в плані $\varphi, ^\circ$ вздовж різальних кромок для кожного зуба дискової обкатної фрези при $Z_{gr}=4$ та $\gamma=10^\circ$

Залежності (4.24) для визначення переднього кута, з урахуванням (4.3, 4.25, 4.27) були введені в програму MathCad та обчислені зміни переднього кута γ в вершинній точці різальних кромок на найбільшому зубі обкатної фрези, а також його зміни вздовж профільюючих ділянок різальних кромок в залежності від параметрів оброблювальної відрізної пили [52,63].

На рисунку 4.9 показано характер зміни переднього кута γ в вершинній точці різальної кромки на найбільшому зубі обкатної фрези в точки М в залежності від кількості зубів, кількості зубів у групі, та переднього кута оброблювальної відрізної пили $\varnothing 250\text{мм}$.

Зі збільшенням кількості зубів у групі геометрія передньої поверхні в кінематичній системі координат стає більш сприятливою [51]. Передні кути приймають позитивні значення на обох різальних кромках. Це пояснюється зменшенням розмірів оброблюваних зубів зі збільшенням їх кількості в групі, при одному і тому ж їх числі. Відповідно, зменшується довжина активних різальних кромок на зубах дискової обкатної фрези.

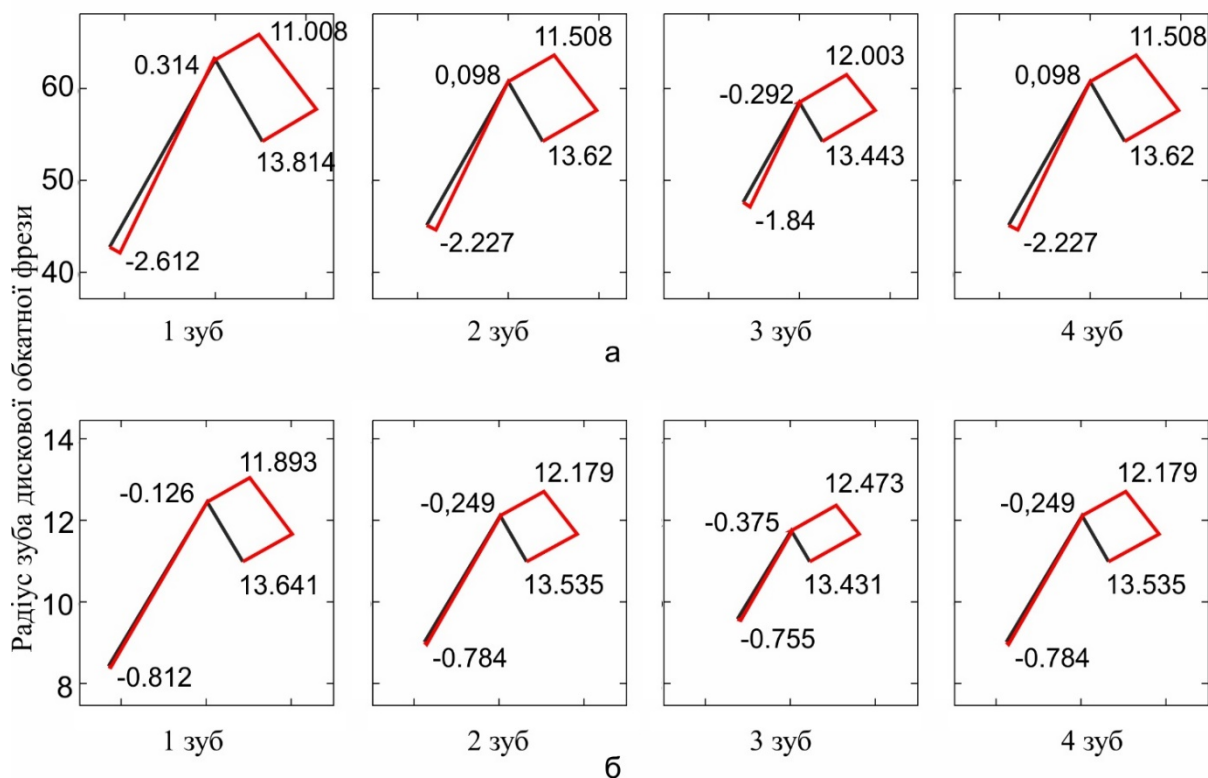


1, 3, 5, 7 при $\gamma=10^\circ$; 2, 4, 6, 8 при $\gamma=5^\circ$

Рисунок 4.9 – Характер зміни переднього кута $\gamma, ^\circ$ в вершинній точці М різальних кромок обкатної фрези в залежності від кількості зубів оброблювальної відрізної пили

На рис. 4.10 показані епюри зміни передніх кутів дискової обкатної фрези вздовж різальних кромок в момент повного врізання зуба в тіло заготовки при кількості зубів у групі при $\varnothing 250\text{мм}$, $Z_{gr}=4$, кількості зубів $Z=40$, та $Z=200$ та передньому куті $\gamma=10^\circ$ оброблювальної відрізної пили.

Аналіз змін кінематичного переднього кута γ вздовж різальних кромок від зуба до зуба показав, що ці зміни лежать в межах 1° та не перевищують допустимих значень.

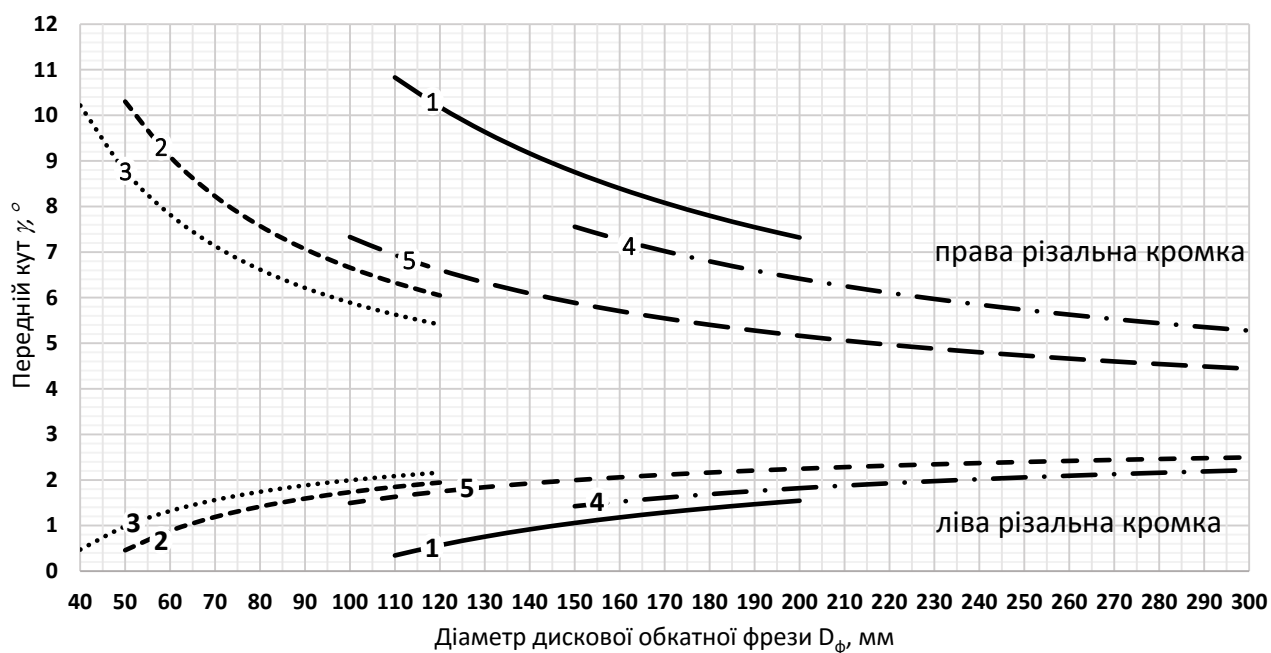


а. $Z=40, \gamma=10^\circ$; б. $Z=200, \gamma=10^\circ$.

Рисунок 4.10 – Епюри зміни переднього кута $\gamma, ^\circ$ вздовж різальних кромок для кожного зуба дискової обкатної фрези при $Z_{gr}=4$

На рис. 4.11 показані зміни переднього кута γ в вершинній точці різальних кромек на найбільшому зубі обкатної фрези в залежності від зміни її діаметра.

Дослідимо зміни заднього кута в процесі обробки відрізних пил [59,60]. За залежністю (4.29) для визначення заднього кута, з урахуванням (4.31, 4.33) в програмі MathCad обчислені зміни заднього кута α в вершинній точці М різальних кромек на найбільшому зубі обкатної фрези, а також його зміни вздовж профілюючих ділянок різальних кромек в залежності від параметрів оброблювальної відрізної пили при $\varnothing 250\text{мм}$.



1. $Z=48$, $D_{\phi min}=105\text{мм}$; 2. $Z=120$, $D_{\phi min}=42\text{мм}$; 3. $Z=192$, $D_{\phi min}=26\text{мм}$; 4. $Z=120$, $D_{\phi min}=146\text{мм}$; 5. $Z=192$, $D_{\phi min}=91\text{мм}$.

Рисунок 4.11 – Зміна переднього кута $\gamma, ^\circ$ в вершинній точці М різальних кромок на найбільшому зубі обкатної фрези в залежності від її діаметра при $Z_{gr}=4$

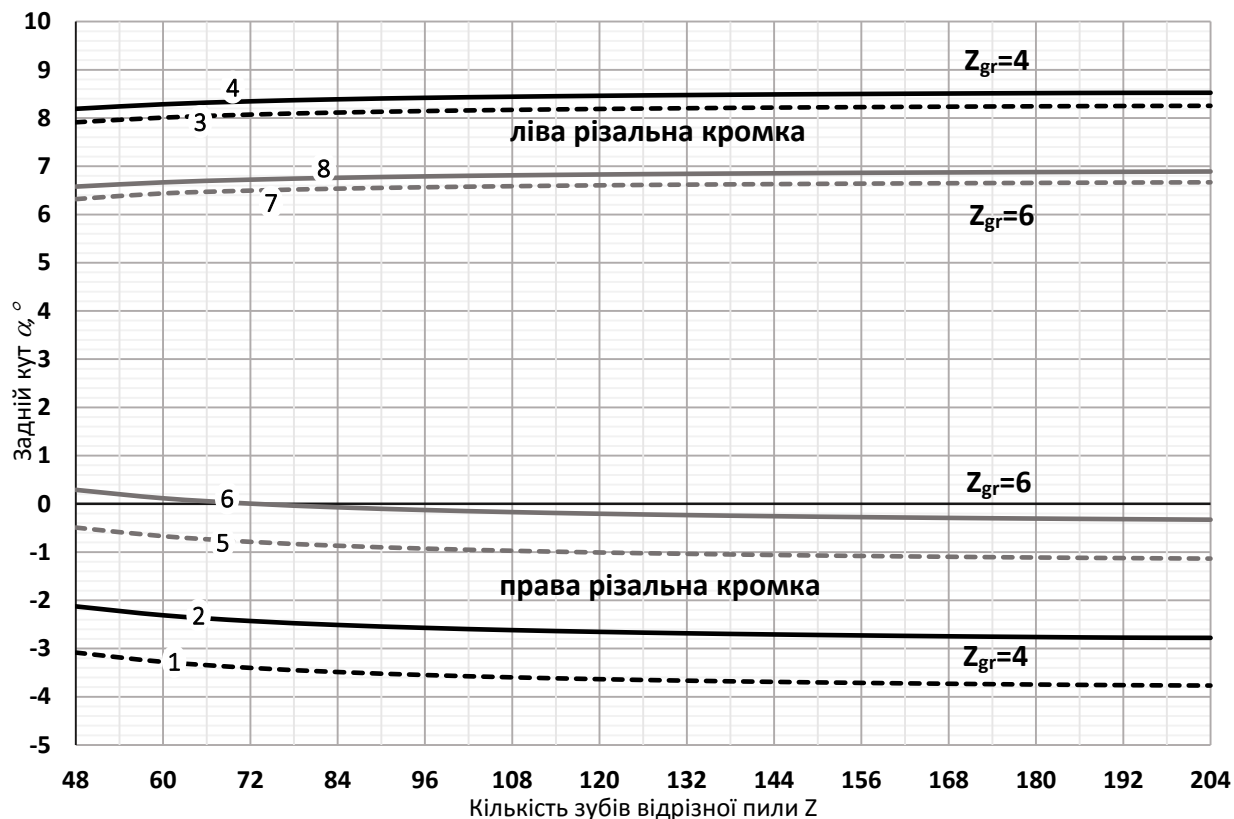
На рисунку 4.12 показано характер зміни заднього кута α на першому найбільшому зубі обкатної фрези в залежності від кількості зубів, кількості зубів у групі, та переднього кута оброблювальної відрізної пили [59,60].

Згідно досліджень при збільшенні кількості зубів виробу задній кут в процесі роботи обкатної фрези зростає. В процесі різання, при прийнятому задньому $\alpha=10^\circ$ куті в вершинній точці різальних кромок, задній кут в процесі роботи на одній різальній кромці має позитивні значення, а на другій – негативні, що недопустимо [59,60].

За рекомендаціями [72,73] мінімальне значення заднього кута α повинно бути не менше $3^\circ\ldots4^\circ$.

Якщо ж прийняти значення заднього кута α_e значно більше, ніж рекомендоване, щоб забезпечити задні кути в процесі роботи не менше $3^\circ\ldots4^\circ$, то на одній з різальних кромок задній кут в процесі роботи обкатної

фрези прийме достатні додатні значення, але на другий різальній кромці він буде надмірно великим, що так само несприятливо[66,67].



1, 3, 5, 7 при $\gamma=10^\circ$; 2, 4, 6, 8 при $\gamma=5^\circ$

Рисунок 4.12 – Характер зміни задніх кутів $\alpha, ^\circ$ обкатної фрези в вершинній точці М різальних кромок на найбільшому зубі обкатної фрези в залежності від кількості зубів оброблювальної відрізної пили при $\alpha=10^\circ$

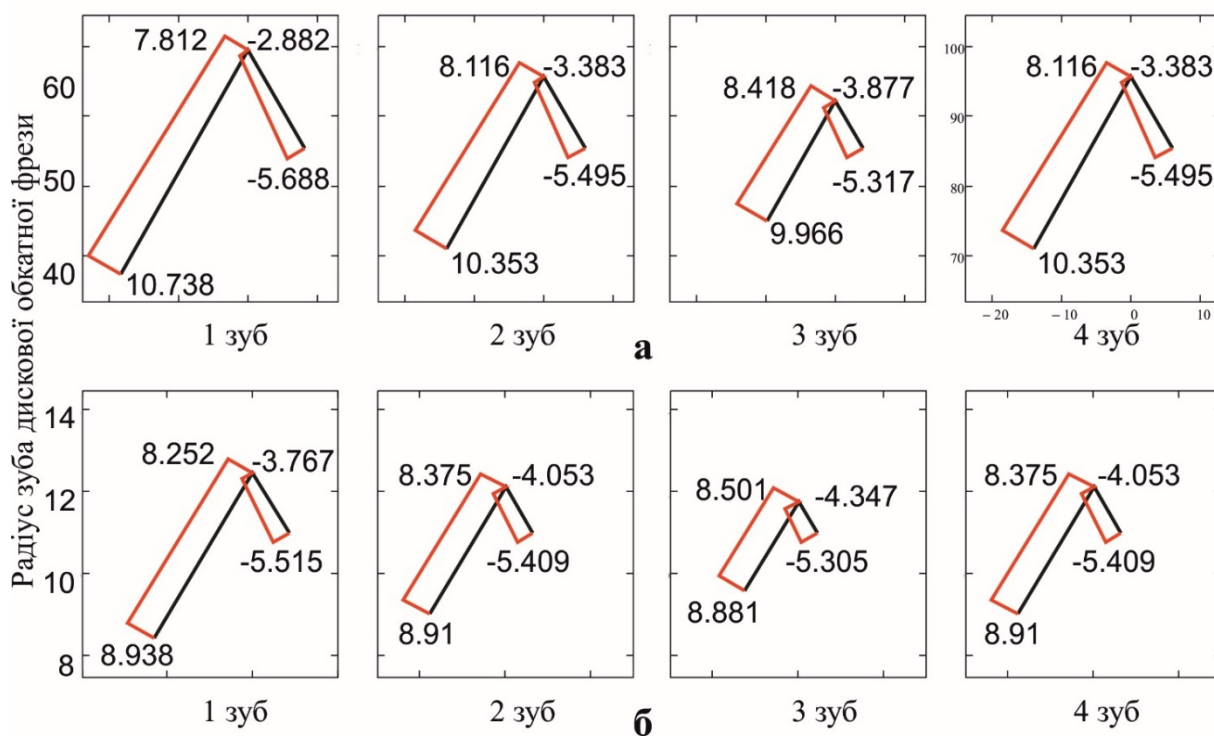
Дослідженнями зміни задніх кутів встановлено, що при обробці відрізної пили з кількістю зубів у групі $Z_{gr}=4$ не можна приймати задній кут згідно рекомендованих значень [66,67].

Слід відзначити, що передня поверхня зубів оброблюваної відрізної пили утворюється правою різальною кромкою обкатної фрези. Тому при нарізанні зубів відрізної пили обкатною фрезою, заданий передній кут пили забезпечується заточуванням задньої поверхні обкатної фрези.

Тому доцільно проводити заточування дискової обкатної фрези при $Z_{gr}=4$ для різних різальних кромок під різними задніми інструментальними кутами в нормальному перетині. Збільшення кількості зубів в групі до $Z_{gr}=6$ або $Z_{gr}=8$, сприятливо позначається на зміні кінематичних задніх кутів α .

Тому зі збільшенням кількості зубів в групі, треба збільшувати інструментальний задній кут в вершинній точці до $\alpha_g = 12^\circ \div 15^\circ$ при цьому більші його значення обирати при обробці відрізних фрез з меншою кількістю зубів у групі і проводити заточування таких фрез з однаковими задніми кутами [66,67].

На рис. 4.13 показані епюри зміни кінематичних задніх кутів дискової обкатної фрези з $\alpha_g = 10^\circ$ вздовж різальних кромок в момент повного врізання в тіло заготовки при $Z_{gr}=4$, кількості зубів $Z=40$, та $Z=200$ відрізної пили, що обробляється [66,67].



а. $Z=40$, $\gamma=10^\circ$; б. $Z=200$, $\gamma=10^\circ$.

Рисунок 4.13 – Епюри зміни задніх кутів $\alpha_k, ^\circ$ обкатної фрези вздовж різальних кромок в момент повного врізання в тіло заготовки ($\alpha_g = 10^\circ$)

Характер змін заднього кута α вздовж різальних кромок від зуба до зуба показав, що ці зміни дуже незначні, та не перевищують 1° . При розподілі кутів уздовж бічних різальних кромок їх значення збільшуються від вершини до ніжки зуба фрези.

Розрахунками встановлено, що при виготовленні дискової обкатної фрези з $Z_0=4$, нормальний задній кут на правій різальній кромці повинен бути не менш ніж $\alpha_{Nnp} = 15^\circ$, на лівій – $\alpha_{Nli} = 5^\circ$ [66,67].

Зміни заднього кута при зазначених α_{Nnp} та α_{Nli} при $Z_{gr}=4$, $Z=200$, $\gamma=10^\circ$ відрізної пили показані на рис. 4.14.

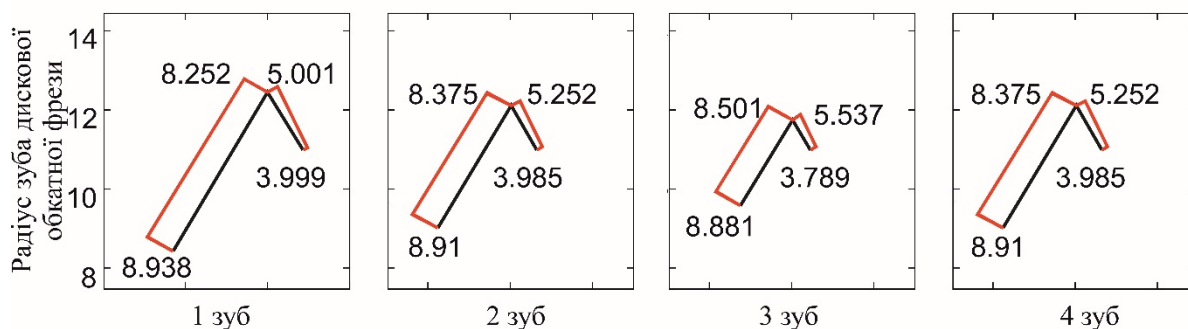
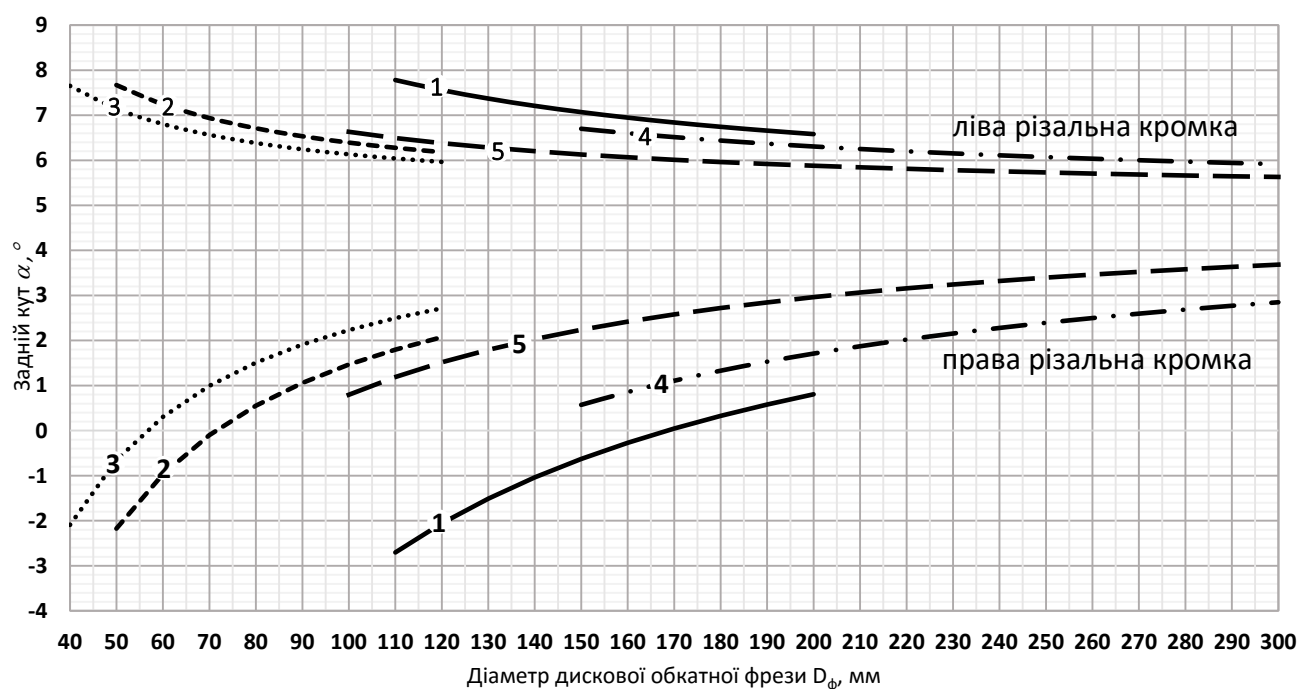


Рисунок 4.14 – Епюри зміни заднього кута α_k , $^\circ$ обкатної фрези вздовж різальних кромок при $\alpha_{Nnp} = 15^\circ$, $\alpha_{Nli} = 5^\circ$

На рис. 4.15 показаний вплив на задній кут діаметра дискової обкатної фрези, на найбільшому зубі обкатної фрези в вершинній точці в момент повного врізання в тіло заготовки [72].

Аналіз змін задніх кутів в процесі роботи обкатної фрези показав, що зі її збільшенням діаметра геометрія задньої поверхні зуба фрези стає більш сприятливою по обом різальним кромкам, та ці зміни менш різкі. По лівій різальній кромці, де задні кути мають занадто великі значення, вони зменшуються, а по правій – збільшуються та набувають додатних значень [72].

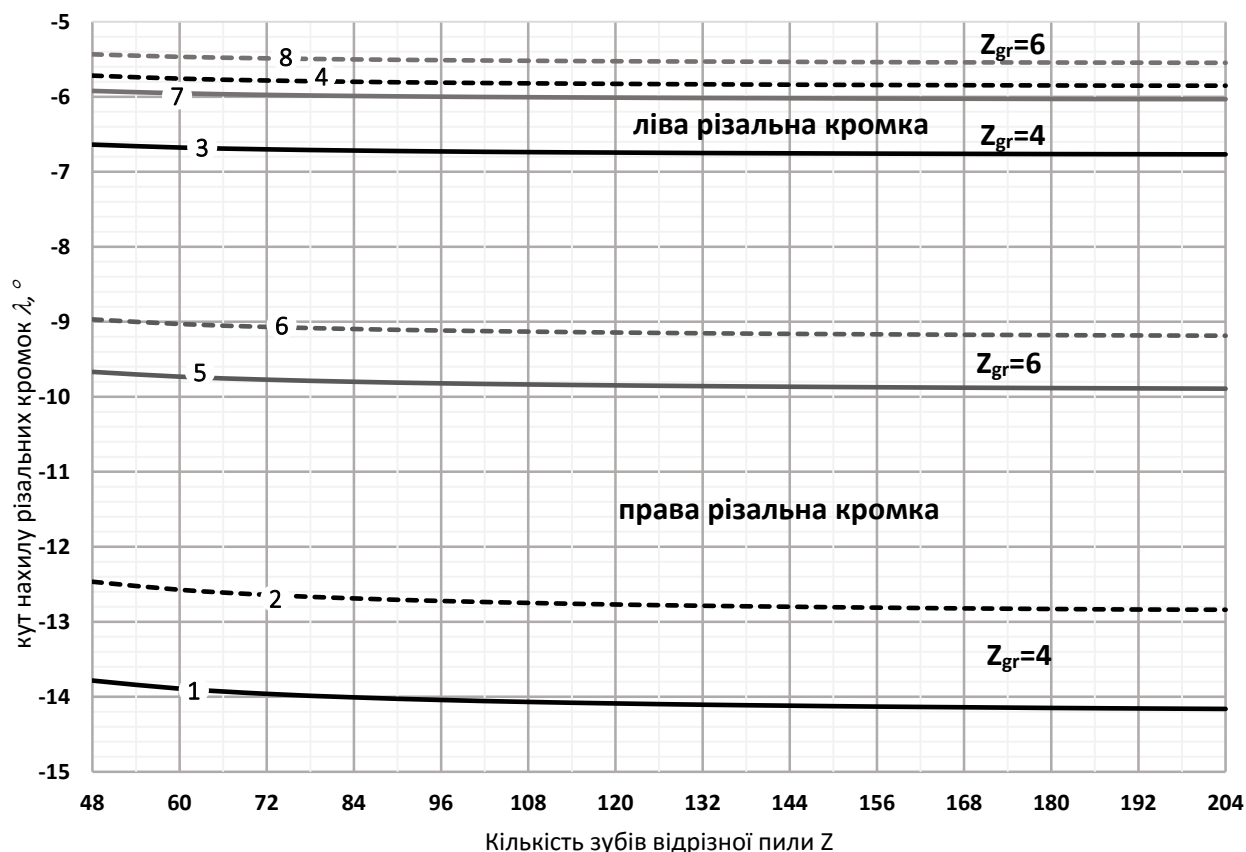
Таким чином, збільшення діаметра фрези порівняно з мінімальним з урахуванням переточувань, позитивно відображається на геометрії різальної частини зуба обкатної фрези, особливо це стосується фрез з $Z_0=4$, так як при збільшенні кількості зубів обкатної фрези до $Z_0=6$ або $Z_0=8$, геометрія передньої та задньої поверхонь стає більш сприятливою.



1. $Z=48, D_{\phi min}=105\text{мм}$; 2. $Z=120, D_{\phi min}=42\text{мм}$; 3. $Z=192, D_{\phi min}=26\text{мм}$; 4. $Z=120, D_{\phi min}=146\text{мм}$; 5. $Z=192, D_{\phi min}=91\text{мм}$.

Рисунок 4.15 – Епюри зміни заднього кута $\alpha, ^\circ$ на найбільшому зубі обкатної фрези в вершинній точці в момент повного врізання в тіло заготовки в залежності від діаметра дискової обкатної фрези при $Z_{gr}=4$

Зміни кутів нахилу різальних кромок λ обкатної фрези в процесі обробки відрізних пил розраховуються за залежністю (4.35). В програмі MathCad обчислені зміни кутів нахилу різальних кромок λ в їх вершинній точці М на найбільшому зубі обкатної фрези, а також його зміни вздовж профілюючих ділянок різальних кромок в залежності від параметрів оброблювальної відрізної пили при $\varnothing 250\text{мм}$ (рис.4.16).



1, 3, 5, 7 при $\gamma=10^\circ$; 2, 4, 6, 8 при $\gamma=5^\circ$

Рисунок 4.16 – Характер зміни кутів нахилу різальних кромки $\lambda, ^\circ$ обкатної фрези в їх вершинній точці М на найбільшому зубі в залежності від кількості зубів оброблювальної відрізної пили

На рис. 4.17 показані епюри зміни кутів нахилу різальних кромки λ в момент повного врізання в тіло заготовки при $Z_{gr}=4$, кількість зубів $Z=40$, та $Z=200$ відрізної пили, що обробляється [66,67].

Аналізуючи зміну геометрії різальної частини дискових обкатних фрез, можна зробити висновок, що при збільшенні висоти зуба фрези (тобто при зменшенні кількості зубів у групі, або зменшенні загальної кількості зубів оброблювальної відрізної пили) росте і збільшується довжина активних різальних кромки зуба фрези і тому, чим більше висота зуба фрези тим більше діапазон зміни кутів уздовж різальної кромки зуба.

Створення прогресивних конструкцій різального інструменту неможливо без аналізу завантаження його різальної кромки. Поряд зі швидкістю різання, величиною активної довжини різальних кромки,

товщини зрізу в кожній точці різальної кромки є важливою характеристикою прогнозування працездатності інструменту.

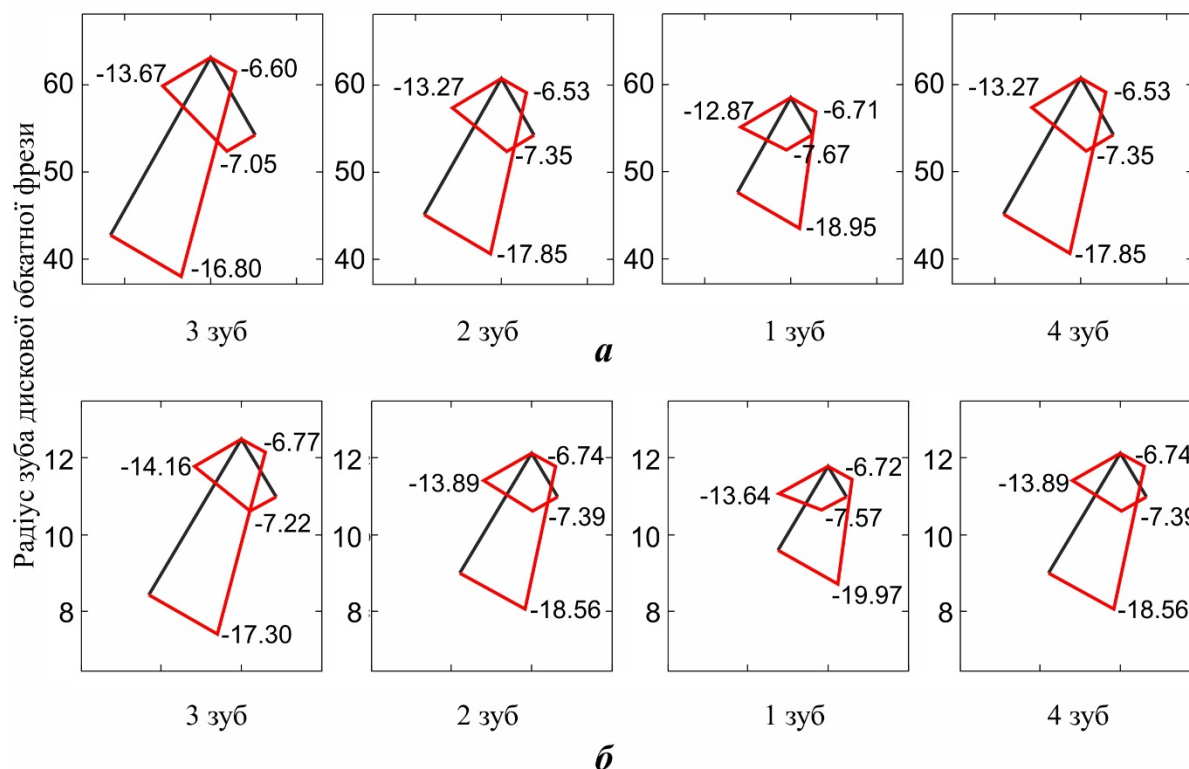


Рисунок 4.17 – Епюри зміни кутів нахилу різальних кромки λ , ° обкатної фрези вздовж її різальних кромки в момент повного врізання в тіло заготовки

Однак методика обробки відрізної пили з нерівномірним кроком способом обкочування передбачає те, що за повний цикл обертання обкатної фрези проводиться обробка тільки від 4 до 8 зубів (кількості зубів в групі).

Дискові обкатні фрези з нерівномірним кроком зубів, що розробляються, призначені для обробки відрізних пил, які мають великі діаметри $D \geq 200\text{мм}$, та кількість зубів $Z > 80$. Висота профілю цих виробів залежить від кількості зубів, та кількості зубів у групі. При великій кількості зубів висота профілю $h \cong 1..4\text{мм}$, та при обробці за декілька проходів товщина зрізу зменшується, та залежить тільки від величини заданої подачі.

Висновки

На основі загальної теорії визначення геометричних параметрів визначена зміна геометричних параметрів вздовж різальних кромок в будь-якій їх точці в довільний момент часу роботи дискової обкатної фрези.

Показано, що зміна геометричних параметрів в процесі роботи залежить від кількості зубів у групі Z_{gr} , діаметра D , та кількості зубів відрізної пили Z .

Встановлено, що зі збільшенням активної довжини різальних кромок зуба дискової обкатної фрези збільшується діапазон зміни кутів фрези вздовж різальної кромки в процесі різання.

Доведено, що для фрез із швидкорізальної сталі рекомендоване значення переднього кута γ_v дискової обкатної фрези може бути 6° .

Встановлено, що зі зменшенням зовнішнього діаметра обкатної фрези задні кути зменшуються, та можуть набувати від'ємних значень, а самі зміни мають більш виражений несприятливий характер, що негативно позначається на обробці фрезами такого діаметру відрізних пил.

Встановлено, що зміна передніх γ та задніх α кутів вздовж різальних кромок фрези носить прямо протилежних характер. При обробці різальною кромкою передньої поверхні пили кут γ збільшується і зменшується при обробці потиличної і навпаки кут α зменшується при обробці передньої поверхні, досягаючи від'ємних значень та збільшується – при обробці потиличної. Для забезпечення сприятливої геометрії вздовж різальних кромок в процесі роботи фрези рекомендовано їх заточувати з різними нормальними кутами: $\alpha_{Nnp} = 15^\circ$ та $\alpha_{Nis} = 5^\circ$.

РОЗДІЛ 5 ЛАБОРАТОРНО-ПРОМИСЛОВА ПЕРЕВІРКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Лабораторні випробування при нарізанні зубів дрібнозубих дискових відрізних пил з нерівномірним кроком в групі проводилась для перевірки результатів теоретичних досліджень щодо розробки дискових обкатних фрез, а саме забезпечення ними основних положень формоутворення при нарізанні таких пил.

Вони спрямовані також на перевірку теоретичних залежностей для визначення їх конструктивних та установочних параметрів при нарізанні пил з нерівномірним кроком заданої точності на зубофрезерному верстаті.

Промислові випробування передбачали визначення перспективності нарізання зубів дискових пил з нерівномірним кроком обкатними дисковими фрезами в порівнянні з існуючими способами за методом копіювання.

Лабораторні випробування включають підготовку заготовок, інструменту та верстату для нарізання дискових пил обкатними дисковими фрезами та нарізання зубів пил з визначенням їх точності.

5.1 Заготовки для нарізання дискових відрізних пил

В якості заготовки був вибраний диск $\varnothing 215$ мм (рис.5.1).

Матеріал заготовки сталь Р6М5 по ГОСТ 19265-73 «Прутки и полосы из быстрорежущей стали. Технические требования».

Сталь Р6М5 за призначенням відноситься до швидкорізальних сталей нормальної продуктивності. Сталь цієї марки в середньому містить 6% вольфраму та 5% молібдену і характеризується підвищеною міцністю та стійкістю в порівнянні з чисто вольфрамовим вмістом. Молібден в їх складі знижує карбідну неоднорідність, що відповідно підвищує пластичність. Завдяки цим якостям Р6М5 рекомендується для виготовлення інструментів,

що працюють в важких умовах, до яких відносяться дискові відрізні пили.

Перевірка результатів теоретичних досліджень здійснювалась на незагартованих заготовках.

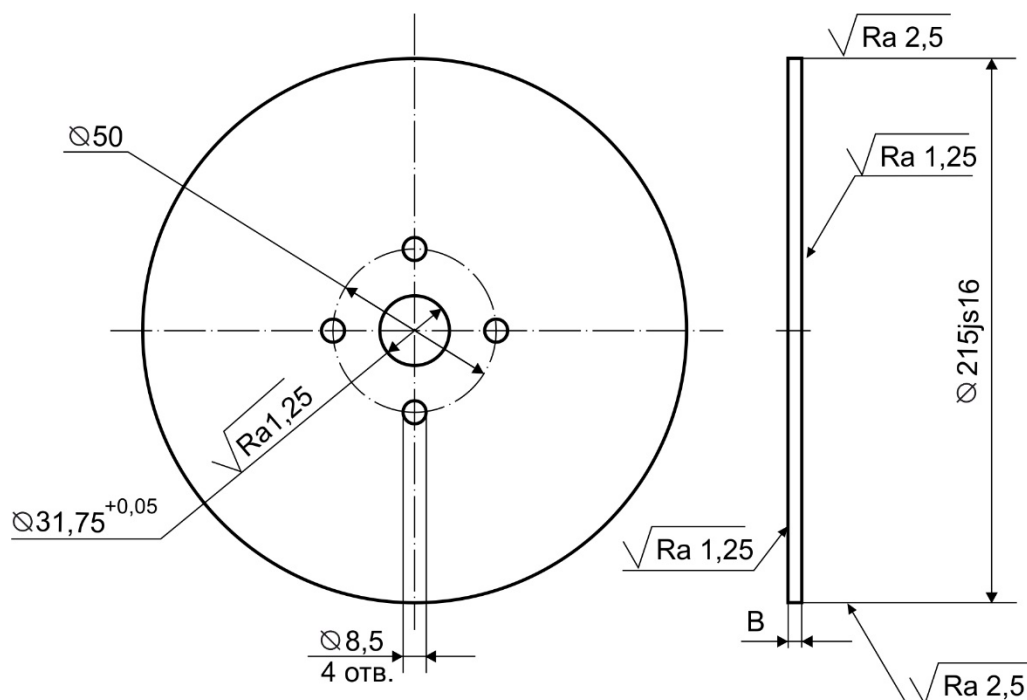


Рисунок 5.1 – Заготовка для нарізання дискових відрізних пил

Як показали розрахунки та дослідження геометрії різальної частини обкатних фрез в процесі роботи, найбільш несприятливим геометричним параметрами характеризується робота дискових обкатних фрез з кількістю зубів $Z_0=4$.

Попередніми дослідженнями показано, що при перпендикулярній установці осі обкатної фрези завжди виникають перехідні криві, радіус яких залежить від параметрів відрізних пил. Якщо радіуси перехідних кривих будуть менші, або дорівнювати радіусу заокруглення западини профіля стружкової канавки, то нарізання зубів пили обкатними дисковими фрезами можна здійснювати при їх перпендикулярній установці.

Для обробки була запропонована відрізна пила з загальною кількістю зубів $Z=96$, кількістю зубів в групі $Z_{gr}=4$ та нерівномірністю зубів у групі $\Delta=30\%$.

В розділі 2 (залежності 2.49, 2.50, 2.53) показано, що на округлення западини профілю стружкової канавки зуба пили при перпендикулярній установці обкатної фрези відносно осі пили впливає товщина диска заготовки відрізної пили (B).

Лабораторні випробування пил з дрібним зубом проводились на заготовках товщиною $B=2,6\text{мм}$. На них перевірялись радіуси западин зубів.

Конструктивні параметри, що вибираються за нормативними документами або рекомендаціями [11,106,111,113,114,119,123,124], та розрахункові параметри (залежності 3.5-3.8), які характеризують профіль зубів пили, від яких залежать параметри зубів обкатної фрези наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Параметри відрізної пили $Z_{gr}=4$.

Назва параметру		№ зуба у групі			
		1	2	3	4
Діаметр	D	215			
Кількість зубів	Z	96			
Кількість зубів у групі	Z_{gr}	4			
Кількість груп зубів	n	24			
Нерівномірність кроку зубів у групі	Δ	30%			
Ширина	b	2.6			
Величина нерівномірності сусідніх зубів у групі	ε_i	4.875°	3.75°	2.626°	3.75°
Кут, що охоплюється однією групою	Ω	15°			
Глибини западин зубів в групі	h_i	3.969	2.98	2.035	2.98
Глибини зубів по передній поверхні	H_i	4.03	3.026	2.067	3.026
Радіуси окружностей западин зубів	r_i	103.534	104.521	105.465	104.521
Передній кут	γ	10°			
Кут в профілю	θ	60°			
Кут нахилу передньої площини відносно вертикалі в перетині, перпендикулярному осьовому	ψ	$\theta/2$ (при симетричному профілі)			
Матеріал	-	P6M5			

Координати точок профілю канавок зубів відрізної пили розраховуються за залежностями (2.12-2.17) в системі координат XYZ (рис. 5.2), та наведені в табл.5.2.

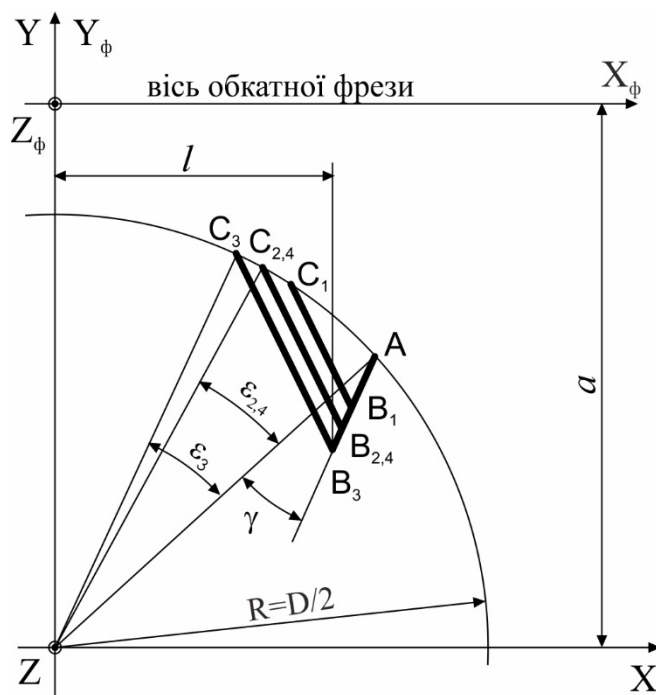


Рисунок 5.2 – Профілі западин зубів відрізної пили накладений один на один при $Z_{gr}=4$

Таблиця 5.2 – Координати точок профіля відрізної пили $Z_{gr}=4$

№ зуба	Координати точок					
	A		B		C	
	X_i	Y_i	X_i	Y_i	X_i	Y_i
1	69.1	82.35	67.085	78.86	61.851	87.924
2	69.1	82.35	67.586	79.729	63.566	86.693
3	69.1	82.35	68.066	80.56	65.256	85.428
4	69.1	82.35	86.693	79.729	63.566	86.693

5.2 Прилади для вимірювання

Вимірювання конструктивних параметрів заготовок відрізних пил проводилось за допомогою мікрометра МК 25 (ГОСТ 6507-90) з діапазоном вимірювань 0–25мм, та допустимою похибкою $\pm 2\text{мкм}$. Також для вимірювання використовувався штангенциркуль ШЦІ 150 (ГОСТ 166-89).

Для вимірювання геометричних параметрів дискової обкатної фрези після її заточки використовувались штангенрейсмус ШР - 400 - 0,05 (ГОСТ 164 - 90), індикатор ІЧ10Р кл.1 (ГОСТ 577-88) з ціною поділки 0,01 мм та великий інструментальний мікроскоп ZEISS (Цейс, Німеччина).

Для статичної обробки результатів вимірювань та їх оформлення використовувались пакети прикладних програм MathCAD 15, MATLAB R2012, CorelDRAW X8, КОМПАС-3D V16 і Microsoft Excel 2013.

Контроль геометричних параметрів та конструктивних елементів дискових відрізних пил після нарізання обкатною фрезою проводилось за допомогою великого інструментального мікроскопа ZEISS (Цейс, Німеччина), технічні характеристики якого наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Технічні характеристики великого інструментального мікроскопа ZEISS

Діапазон вимірювання довжин:	в поздовжньому напрямку	0...150 мм
	в поперечному напрямку	0...50 мм
Діапазон вимірювання плоских кутів окулярною кутомірною головкою		0...360°
Максимальна відстань між об'єктивом і предметним склом координатного столу		200 мм
Відстань від колонки до осі тубуса (виліт)		165 мм
Межі вимірювань в третій координаті при роботі з контактним пристроєм		28 мм
Ціна ділення	шкали окулярної кутомірної головки	1°
	ноніуса шкали нахилу лінії центрів бабки	30°
	ноніуса шкали повороту накладного круглого столу	3°
Дискретність цифрового відліку при лінійних вимірах		0,001 мм
Маса виробу, що вимірюється		20 кг
Габаритні розміри мікроскопа, не більше		870 мм x 830 мм x 870 мм

5.3 Підготовка інструмента для нарізання пил з нерівномірним кроком

Так як нарізувались пили з нерівномірним кроком зубів в групі ($Z_{gr}=4$), то відповідно для цього була спроектована та виготовлена дискова обкатна фреза.

5.3.1 Дисківа обкатна фреза

Для досліджень була обрана фреза с діаметром найбільшого зуба $D_{\phi}=132$ мм (рис. 5.3).

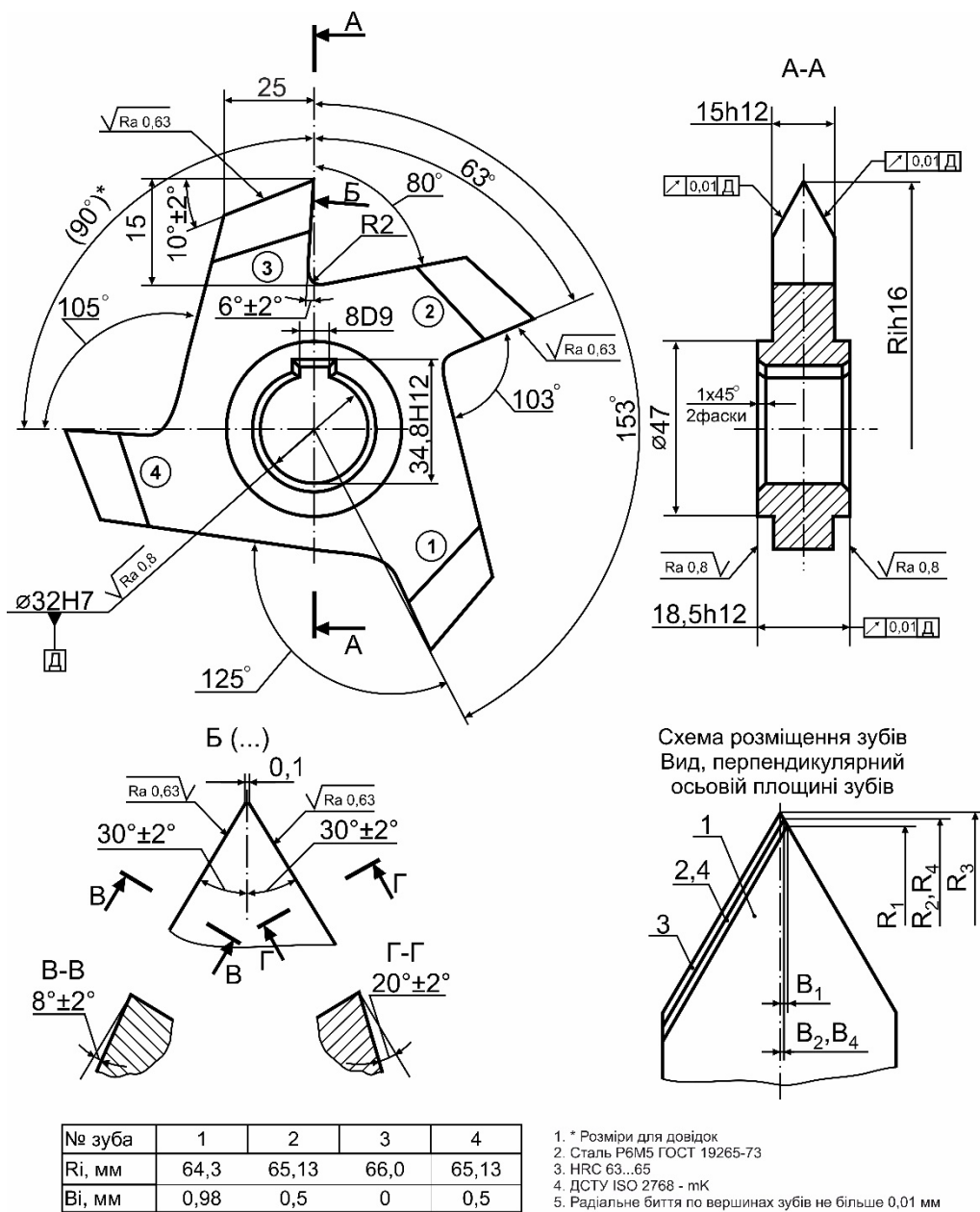


Рисунок 5.3 – Обкатна фреза $Z_0=4$

За залежністю (2.24, рис.2.5) міжосьова відстань $a=144.71$ мм.

Знаючи координати точок ABC пили (табл.5.4) за формулами перетворення координат (2.7-2.9) в системі $X_{\phi}Y_{\phi}Z_{\phi}$ визначаємо координати точок різальних кромок обкатної фрези.

Таблиця 5.4 – Координати точок різальних кромок обкатної фрези $Z_0=4$

№ зуба	Координати точок					
	<i>A</i>		<i>B</i>		<i>C</i>	
	$X_{\phi i}$	$Y_{\phi i}$	$X_{\phi i}$	$Y_{\phi i}$	$X_{\phi i}$	$Y_{\phi i}$
1	69.1	-62.36	67.085	-65.85	61.851	-56.786
2	69.1	-62.36	67.586	-64.981	63.566	-58.017
3	69.1	-62.36	68.066	-64.15	65.256	-59.282
4	69.1	-62.36	86.693	-64.981	63.566	-58.017

Зуби обкатної фрези характеризуються різними радіусами вершин R_i , та зміщенням їх відносно вершини першого зуба фрези B_i . Дисківа обкатна фреза має нерівномірний окружний крок $\varepsilon_{\phi i}$, що забезпечує нерівномірність кроку в групі відрізної пили (рис.5.3).

Працездатність дискової обкатної фрези забезпечується заточкою її зубів в відповідності з кресленням.

5.3.2 Заточування інструменту

Заточування інструменту проводилося на універсально-заточувальному верстаті моделі 3В642 за допомогою 3-х поворотної універсально-заточувальної головки [40].

Заточування фрези зі швидкорізальної сталі Р6М5 здійснювалось чашковим кругом з кубічного нітриду бору (кубоніт) 12А2-45° 125×40×5×5×32 ЛО8 В2-01 100%. Швидкість різання при заточуванні була 20м/с., поперечна подача $S=0,05\text{мм/дв.х}$ поздовжнього стола [40].

Як показано на кресленні, задні кути в нормальному перерізі на правій і лівій різальних кромках мають різні значення, що продиктовано необхідністю забезпечення їх позитивних значень в процесі роботи.

Налаштування заточувального верстата та процес заточки дискової обкатної фрези запропонованої конструкції показано на рис. 5.4, рис. 5.5.



Рисунок 5.4 – Заточування по передній та по задній поверхням



Рисунок 5.5 – Заточування фаски по задній поверхні

Для контролю отриманих геометричних параметрів після заточки проводилась серія вимірювань.

Передній кут безпосередньо вимірювався на великому інструментальному мікроскопі (рис. 5.6).

Вимірювання задніх кутів в нормальному перерізі до різальних кромок здійснювалась за допомогою 3-х поворотною універсально-заточувальної головки. Передня площина кожного зуба встановлювалась в вертикальне положення. Після повороту головки на величину половини кута профілю дискової обкатної фрези ϕ , проводилась серія вимірювань задніх кутів на правій і лівій різальних кромках (рис.5.7).

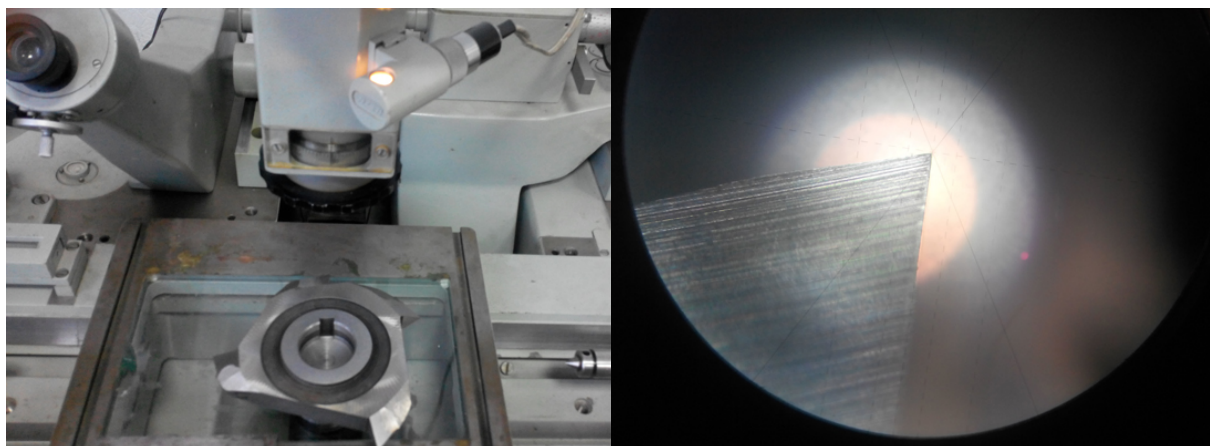


Рисунок 5.6 – Вимірювання переднього кута



Рисунок 5.7 – Вимірювання задніх кутів

Отримані величини задніх кутів в нормальному перерізі, після обробки результатів вимірювань наведені в табл. 5.5. Відхилення геометричних параметрів після заточування не перевищували $\pm 1^\circ$.

Таблиця 5.5 – Геометричні параметри після заточування дискової обкатної фрези с $Z_0=4$

Номер зуба	Передній кут γ_v	Задній кут по лівій різальній кромки $\alpha_{Nлв}$	Задній кут по правій різальній кромки $\alpha_{Nпр}$
1	$6^\circ 15' \pm 2'$	$7^\circ 58' \pm 2'$	$20^\circ 18' \pm 6'$
2	$5^\circ 49' \pm 1'$	$8^\circ 6' \pm 3'$	$20^\circ 55' \pm 5'$
3	$6^\circ 10' \pm 2'$	$8^\circ 6' \pm 3'$	$20^\circ 39' \pm 5'$
4	$5^\circ 57' \pm 2'$	$7^\circ 33' \pm 2'$	$19^\circ 25' \pm 5'$

Параметри виготовленої для проведення лабораторних випробувань дискової обкатної фрези наведені в табл. 5.6.

Таблиця 5.6 – Параметри дискової обкатної фрези с $Z_0=4$

Назва параметру	Позначення	№ зуба			
		1	2	3	4
Величина нерівномірності сусідніх зубів, °	$\varepsilon_{\phi i} \pm 20'$	117	90	63	90
Радіус вершин зубів, мм	$R_{\phi i} h 16$	65.85	64.98	64.15	64.98
Зміщення вершин зубів, мм	$B_i h 12$	7.50	7.00	6.52	7.00
Діаметр під оправку, мм	$d_0 H 7$	32			
Товщина, мм	$B_{\phi} h 12$	25			
Діаметр ступиці, не менш ніж, мм	D_{cm}	47			
Ширина ступиці, мм	B_{cm}	$B+(0,2 \div 3) \text{ мм}$			
Висота шпонкового пазу, мм	C_1	$34,8_0^{+0,2}$			
Ширина шпонкового пазу, мм	A_1	8			
Передній інструментальний кут в вершинній точці, °	γ_{ϕ}	6			
Задній нормальний кут лівої різальної кромки, °	$\alpha_{N_{\text{лів}}}$	8			
Задній нормальний кут правої різальної кромки, °	$\alpha_{N_{\text{пр}}}$	20			
Кут в плані, °	φ	60			
Матеріал фрези	-	P6M5			

5.4 Лабораторні випробування

Експерименти по нарізуванню відрізних пил з нерівномірним кроком запропонованим способом [50,68] проводилися на зубофрезерному верстаті [91] мод. 5A312, який відповідає вимогам ГОСТ 659-78 (рис 5.8), характеристики якого наведені в табл.5.7.



Рисунок 5.8 – Зубофрезерний верстат 5А312

Таблиця 5.7 – Характеристики зубофрезерного верстата 5А312

Найбільший діаметр нарізаємого колеса, мм.	320
Найбільший модуль нарізаємого колеса, мм.	6
Найбільша ширина нарізаємого колеса при $\beta=0$, мм.	180
Найбільший діаметр фрези, мм.	160
Осьова подача, мм/об.	0.25-6
Радіальна подача, мм/об.	0.3-6
Потужність двигуна головного приводу, кВт.	7.5
Габаритні розміри в плані, мм.	2000x1240
Маса, кг.	5250
Клас точності верстата за ГОСТ659-67	Н
Додаткові можливості верстата	Кроковий механізм осьового переміщення фрези

Відрізна пила з нерівномірним кроком зубів, яку треба оброблювати, наведена на рис.5.9.

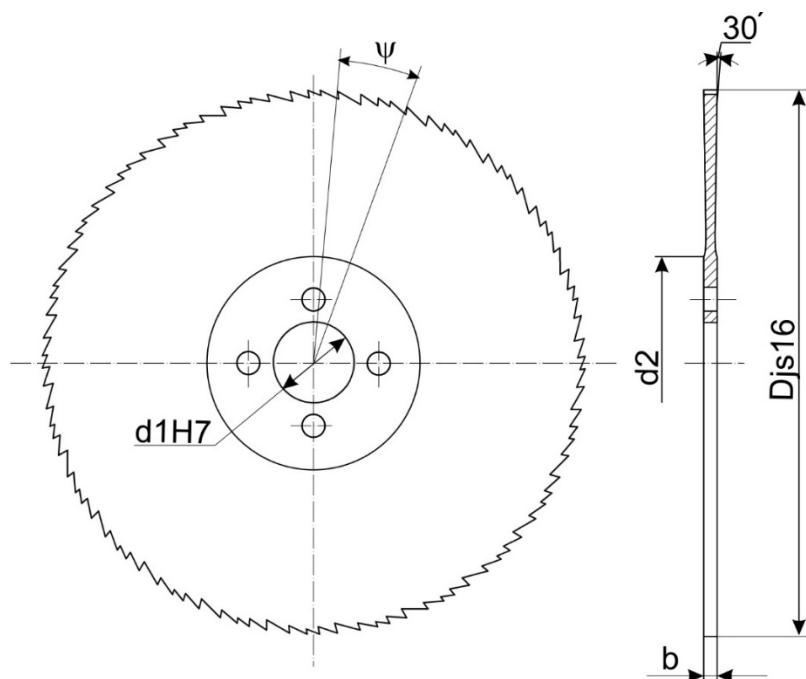


Рисунок 5.9 – Відрізна пила з нерівномірним кроком $Z_{gr}=4$, $\Delta=30\%$

Нарізування зубів пил здійснювалось при перпендикулярній установці обкатної фрези відносно осі пили.

Параметри установки обкатної фрези на зубофрезерному верстаті при перпендикулярній установці розраховуються за залежностями (2.23, 2.24).

Параметри налаштування верстата, та установчі параметри наведені в табл. 5.8.

Таблиця 5.8 – Параметри налаштування верстата та параметри встановлення дискової обкатної фрези

Оберти шпинделя n , об/хв	118
Передаточне відношення U	24
Осьова подача S , мм/об	0.2
Змащувально- охолоджуюча суміш	мастило індустріальне – 20
Зміщення осі обкатної фрези відносно осі відрізної пили l , мм	67.085
Міжосьова відстань a , мм	144.71

Налаштування зубофрезерного верстата 5A312 та процес обробки відрізної пили при перпендикулярній установці осі обкатної фрези показано на рис. 5.10.



а



б

Рисунок 5.10 – Налаштування зубофрезерного верстата 5А312 (а) та обробка відрізної пили з нерівномірним кроком з $Z_{gr}=4$, $D=215\text{мм}$, $Z=96$, $\gamma=10^\circ$ (б)

Після нарізування зубів пил вимірювались радіуси западин стружкових канавок (перехідні криви), оброблюваної пили. Нарізання зубів пил без перехідних кривих може бути здійснене при нахиленій установці обкатних фрез відносно осі пили під кутом β .

Кут β розраховується за формулою (2.39). Аналіз (2.39) показує, що нарізання пил без перехідних кривих обкатними фрезами потребує певного кута β нахилу обкатної фрези для кожної точки, яка формує стружкову канавку, що може бути досягнуто на верстатах з ЧПК.

5.5 Результати вимірювань

В процесі вимірювання контролювалися параметри профілю пил з нерівномірним кроком зубів в групі.

До параметрів, які характеризують профіль відрізної пили з нерівномірним кроком відносяться:

- передній кут γ

- кут профілю θ ;
- кутовий крок кожного зуба у групі ε_i ;
- радіус кожного зуба R ;
- радіус заокруглення в западині зуба r .

На кожній відрізній пилі було безпосереднє здійснене серія прямих вимірювань переднього кута γ та кута профілю θ . Розраховано середнє арифметичне результатів ряду вимірювань, перевірено наявність надмірних похибок і за необхідності їх виключено із результатів вимірювань. За допомогою критерія Стюдента з довірчою ймовірністю $P=0,99$ обчислювалась абсолютна похибка результатів вимірювання [25].

Також по кожній пилі було здійснено серію вимірювань координат базових точок, за допомогою яких визначено наступні параметри:

- кутовий крок кожного зуба у групі ε_i ;
- радіус кожного зуба R ;
- радіус заокруглення в западині зуба r .

Вимірювання геометричних та конструктивних параметрів відрізних пил наведені на рис. 5.11.

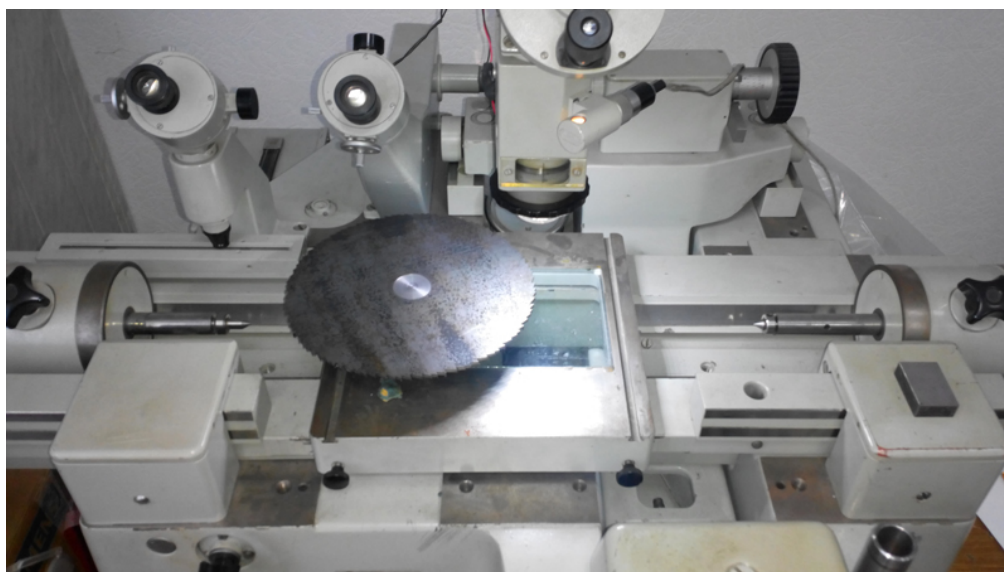


Рисунок 5.11 – Вимірювання геометричних та конструктивних параметрів відрізної пили на великому інструментальному мікроскопі

Отриманні при вимірюванні координати опорних точок вводились в CAD програми КОМПАС-3D, проведена апроксимація, та визначались конструктивні параметри відрізної пили (табл.5.9).

Таблиця 5.9 – Геометричні та конструктивні параметри відрізної пили з нерівномірним кроком

Номер зуба	1	2	3	4
Передній кут γ				
Середнє значення i похибка	$10^{\circ}\pm7'$	$10^{\circ}\pm6'$	$10^{\circ}\pm8'$	$10^{\circ}\pm7'$
Задані значення	$10^{\circ}\pm2^{\circ}$	$10^{\circ}\pm2^{\circ}$	$10^{\circ}\pm2^{\circ}$	$10^{\circ}\pm2^{\circ}$
Кут профілю θ				
Середнє значення i похибка	$61^{\circ}\pm12'$	$61^{\circ}\pm11'$	$60^{\circ}\pm14'$	$61^{\circ}\pm12'$
Задані значення	$60^{\circ}\pm2^{\circ}$			
Кутовий крок ϵ_i				
Середнє значення i похибка	$2^{\circ}39'\pm10'$	$3^{\circ}43'\pm18'$	$4^{\circ}50'\pm18'$	$3^{\circ}47'\pm16'$
Задані значення ДСТУ ІСО 2768-1-2001	$2^{\circ}37'\pm20'$	$3^{\circ}45'\pm20'$	$4^{\circ}52'\pm20'$	$3^{\circ}45'\pm20'$
Радіус зубів пили R , мм				
Середнє значення i похибка	$107.47\pm0,15$	$107.46\pm0,15$	$107.49\pm0,15$	$107.51\pm0,15$
Задані значення	$107.500\pm0,145$			

Результати вимірювань радіуса заокруглення в западині після статистичної обробки наведені в табл. 5.10.

Таблиця 5.10 – Радіус заокруглення западин стружкових канавок пил при перпендикулярній установці фрези відносно осі пили

Номер зуба	1	2	3	4
Середнє значення i похибка	$0.35 \pm 0,05$	$0.34 \pm 0,04$	$0.33 \pm 0,02$	$0.35 \pm 0,02$

Результати лабораторних випробувань підтвердили теоретичні положення формоутворення відрізних пил з нерівномірним кроком зубів у групі дисковими обкатними фрезами, які покладені в основу теорії проектування цих фрез.

Таким чином розроблена в роботі теорія являє собою теоретичну основу розробки обкатних фрез для обробки відрізних пил незалежно від профілю зуба пили та програм для їх виготовлення на верстатах с ЧПК, що найефективніше здійснюється на основі автоматизованого проектування обкатних фрез.

5.6 Автоматизоване проектування дискових обкатних фрез

Автоматизоване проектування дискових обкатних фрез дозволяє проводити розрахунки геометричних і конструктивних параметрів інструменту, а також автоматично будувати 3D-модель і робоче креслення за розрахованими даними [16,17,90,101,116].

Автоматизоване проектування дискових обкатних фрез перш за все передбачає побудову структурної схеми САПР, яка розробляється в відповідності з методикою проектування фрез.

5.6.1 Розробка структурної схеми автоматизованого проектування дискової обкатної фрези

На базі розробленої теорії формоутворення дискових обкатних фрез для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком та за результатами проведених досліджень та виведених залежностей по визначенню конструктивних параметрів розроблена структурна схема САПР [16,17,32] дискових обкатних фрез з нерівномірним кроком (рис.5.12), яка забезпечує проектування та розробку дискових обкатних фрез для обробки відрізних пил з різними вхідними параметрами.

Запропонована схема складається з таких взаємопов'язаних між собою двох основних блоків:

1. Вхідних параметрів;
2. Проектування обкатної фрези, який включає три підблоки:

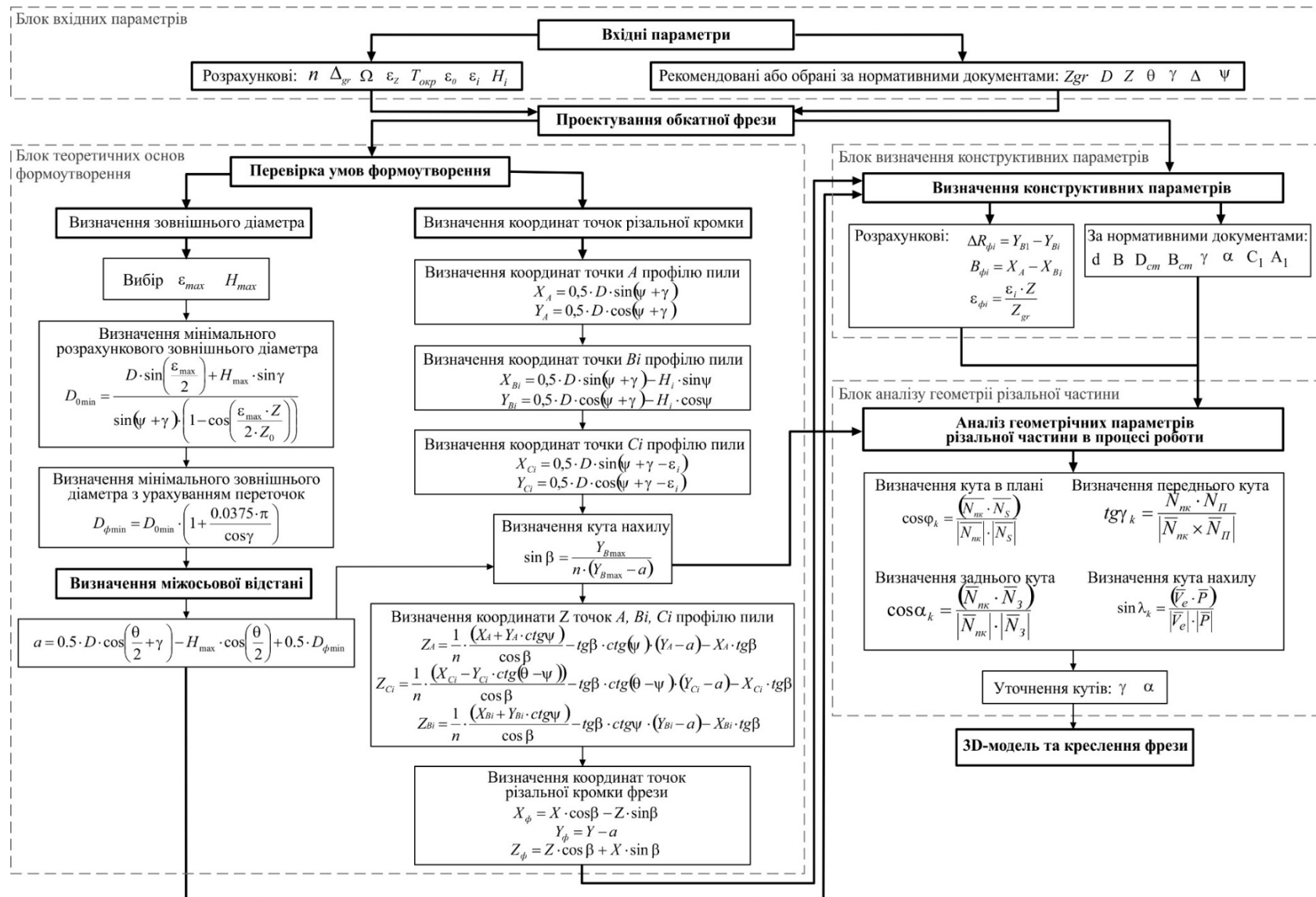


Рисунок 5.12 - Структурна схема САПР дискових обкатних фрез з нерівномірним кроком

- теоретичні основи формоутворення відрізних пил;
- визначення конструктивних параметрів;
- дослідження геометричних параметрів в процесі роботи.

Вхідними параметрами для проектування обкатних фрез є параметри відрізної пили, що оброблюється. Ці параметри розділяються на розрахункові та ті, що вибираються згідно рекомендацій [106,111,113,114,119] або за нормативними документами [11]. До розрахункових параметрів відносяться: n – кількість груп нерівномірних зубів, Δ_{gr} – нерівномірність зубів у групі, Ω - кут, що охоплюється однією групою зубів, ε_z - нормальний кутовий крок, $T_{окр}$ – окружний крок, ε_0 – мінімальний крок зубів, ε_i – кутові кроки зубів у групі, H_i – глибина западини зуба по передній поверхні.

До параметрів, які вибирають за рекомендаціями або нормативними документами відносяться кількість зубів у групі - Z_{gr} , діаметр – D , загальна кількість зубів - Z , кут профілю - θ , передній кут - γ , нерівномірність кроку - Δ , кут - ψ (який в випадку симетричного профіля дорівнює половини кута профілю θ).

Координати X та Y точок різальних кроком характеризують величину зміни радіусів вершин кожного зуба обкатної фрези, зміщення вершин зубів відносно найбільшого зуба фрези. Координати Z визначають положення різальних кромок при побудові 3D моделі обкатної фрези.

Наступним кроком проектування дискової обкатної фрези є визначення її конструктивних параметрів, розрахункових та обраних за нормативними документами. До розрахункових відносяться: різниця між радіусами зубів - ΔR_{fi} , зміщення вершин зубів відносно найбільшого зуба - B_{fi} та кутові кроки зубів фрези ε_{fi} . За нормативними документами або рекомендаціями інших джерел вибираються діаметр посадкового отвору – d , ширина фрези – B_ϕ , довжина зуба по задній поверхні – L_z , діаметр ступиці D_{cm} , ширина ступиці – B_{cm} , передній та задній кут в вершинній точці γ_v та α_v ,

висота та ширина шпонкового пазу C_1 та A_1 . В блоку аналізу геометрії різальної частини обкатних фрез визначаються та аналізуються геометричні параметри різальної частини обкатної фрези в процесі її роботи в кінематичній системі координат, завдяки чому, для конкретних умов роботи, параметрів оброблювальної відрізної пили та матеріалу, уточнюються передні та задні кути.

Проектування дискових обкатних фрез та нарізання зубів відрізних пил на сучасному етапі розвитку науки і техніки здійснюється двома шляхами, а саме в автоматизованому та неавтоматизованому виробництві.

Ця задача в найбільшій мірі може бути вирішена комплексно з застосуванням сучасних програм [65,117], зокрема програми SolidWorks. Тому необхідно було створити параметричну модель дискової обкатної фрези та розробити прикладну програму для розрахунку дискової обкатної фрези по введеним користувачем параметрам, створення її 3D моделі та креслення [13].

5.6.2 Створення твердотільної моделі та креслення

Для вирішення завдання автоматизованого проектування, використовуючи запропоновану структурну схему САПР дискової обкатної фрези (рис.3.4) була розроблена програма розрахунку конструктивних параметрів обкатної фрези з нерівномірним кроком з використанням CAD-систем, яка реалізована за допомогою мови Visual Basic [10]. У програмі SolidWorks [32,93] створюється параметрична модель обкатної фрези, яка наведена на рис. 5.13.

З використанням параметричної моделі може бути побудована твердотільна 3D-модель обкатної фрези для обробки відрізних пил з будь-якими параметрами зубів.

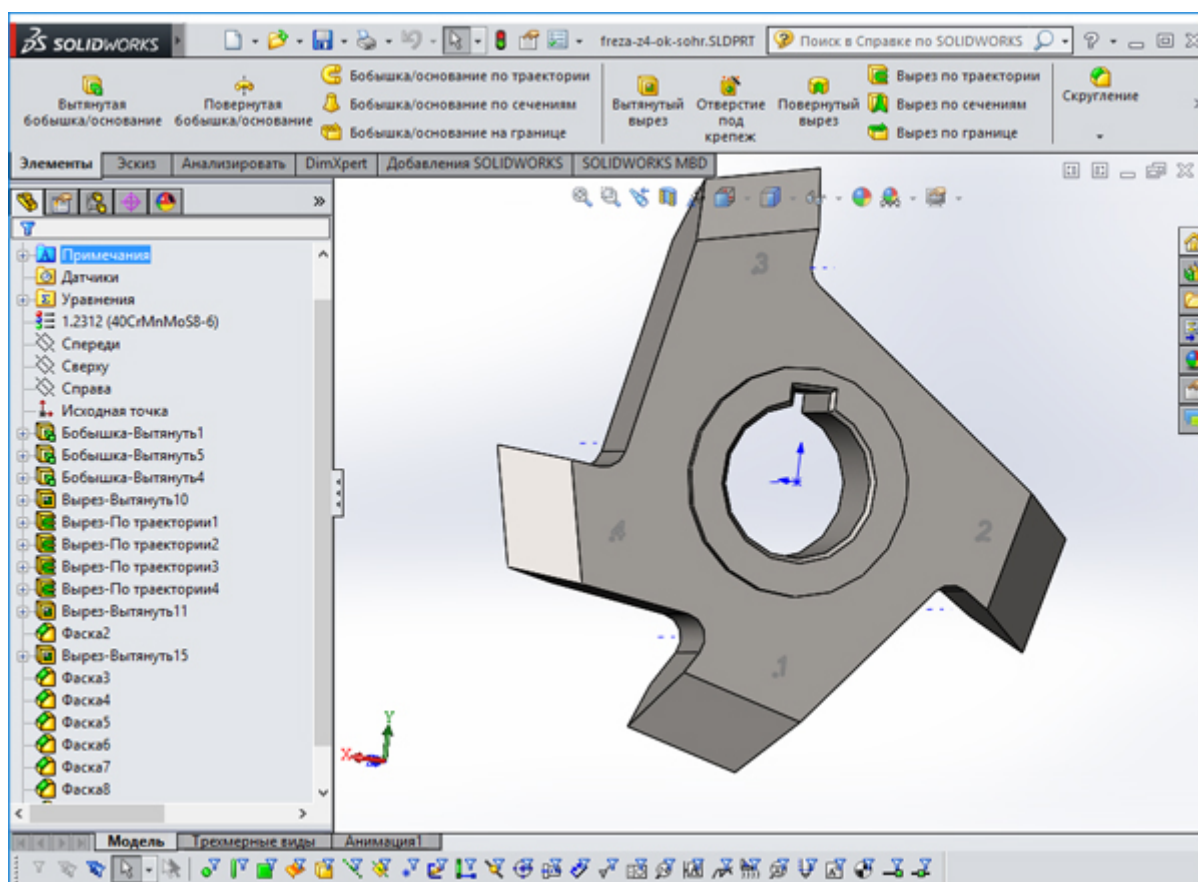


Рисунок 5.13 - Параметрична модель дискової обкатної фрези з нерівномірним кроком в середовищі програми автоматизованого проектування SolidWorks

Робота програми починається з введення вхідних даних в відповідні поля діалогового вікна програми для проектування обкатної фрези на основі її параметричної моделі (рис.5.14).

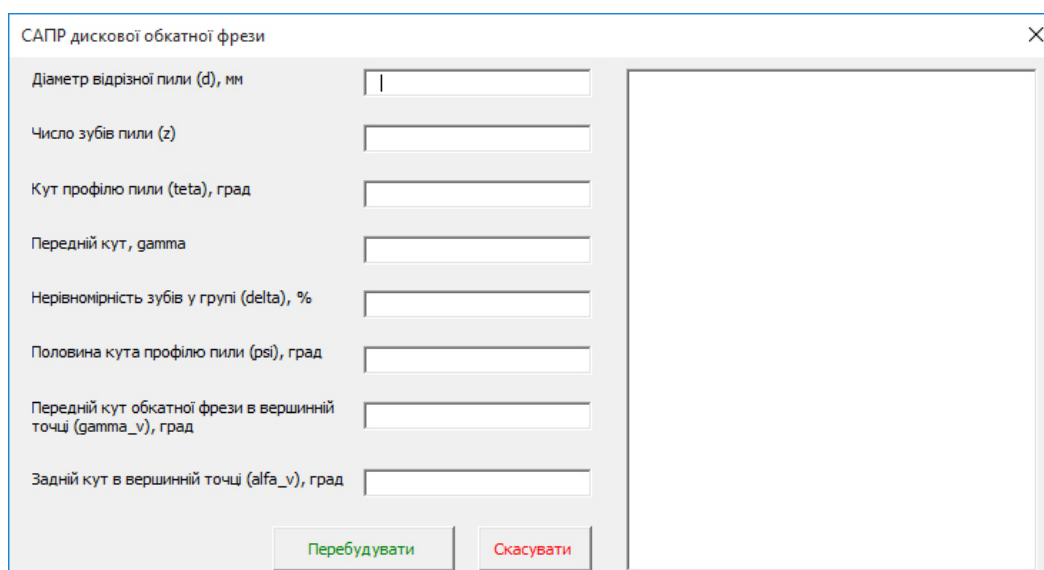


Рисунок 5.14 – Діалогове вікно програми

Після введення вхідних параметрів, програма здійснює попередні розрахунки, результати яких виводить в текстове поле вікна. Наслідком роботи програми є побудова 3D-моделі обкатної фрези для обробки заданої відрізної пили з нерівномірним кроком та її креслення.

По побудованій 3D-моделі обкатної фрези у програмі SolidWorks створюється креслення фрези.

5.7 Рекомендації з автоматизованого проектування дискових обкатних фрез для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком

Для реалізації автоматизованого проектування дискових обкатних фрез, призначених для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком розроблені алгоритм та програма створення тривимірної параметричної моделі фрези (Додаток Д (таблиця Д.1 та додаток Д.2)).

Алгоритм складається з двох розділів:

- перший розділ пов'язаний з визначенням параметрів пил, які служать вхідними при проектуванні фрез;
- другий розділ містить розрахунок та призначення конструктивних параметрів дискових обкатних фрез.

Перший розділ включає блок вхідних параметрів для визначення кожного профілю з нерівномірним кроком в групі та блок розрахунку.

В другому – відповідно з визначення параметрів профілів фрези та блок розрахункових та рекомендованих нормативними документами конструктивних параметрів цього інструменту.

Для визначення профілів відрізних пил з нерівномірним кроком задаються в відповідності з рекомендаціями ГОСТ 2679-93 (ISO 2296-72) та іншими нормативними документами: діаметром пили D , загальною кількістю зубів пили Z , кутом профілю θ , переднім кутом γ .

Кількість зубів обкатної фрези дорівнює кількості зубів у групі відрізної пили. Крок зубів обкатної фрези змінюється в залежності від

обраного закону та параметру нерівномірності розподілення зубів у групі відрізної пили.

Нерівномірність кроку в групі Δ задається за законом трикутника і приймається у відсотках від номінального кроку пили та впливає на глибину стружкових канавок. Розрахункові глибини канавок наведені в таблиці А3 (додаток А).

За вхідними даними першого розділу розраховується координати точок. Що визначають профілі пили з нерівномірним кроком в групі, які полеглі в основу визначення таких конструктивних параметрів фрез, як мінімальний та зовнішній діаметр фрези з урахуванням переточок, параметри нерівномірності кроків, координати граничних точок прямолінійних різальних кроком, радіус кожного зуба та зміщення вершин зубів відносно осьової площини.

Для створення параметричної моделі з подальшою побудовою твердотільної та розробки креслень фрези необхідно знати такі конструктивні параметри, як діаметр отвору під оправку, ширину фрези, висоту та довжину зуба, діаметр та ширину ступиці, висоту ступиці. Ця група параметрів залежить від діаметра фрези D_ϕ . При їх визначенні рекомендується використовувати стандарт ГОСТ 50181-92, ГОСТ 10996-64.

Відомо, що розмір стружкової канавки передбачає вільне розміщення в ній стружки, не допускаючи її пакетування [35,83,112,120], то найбільш критичним випадком по цьому критерію буде канавка з найменшою глибиною. Тому визначення діапазону типорозмірів відрізних пил, який можна обробити однією обкатною фрезою здійснюється орієнтуючись на канавку в групі з мінімальною глибиною.

В таблиці А.5 та таблиці А.6 (додаток А) наведені розрахункові значення найменшої глибини канавки в групі та межі її допустимих значень. Згідно цієї таблиці визначається розрахункова висота найменшої стружкової канавки в групі та орієнтуючись на цей параметр, за таблицями

додатку А визначаються параметри Z , D , γ відрізних пил, які дозволяє обробити існуюча обкатна фреза з відомими Z_0 та Δ , в відповідності до креслення.

Слід відзначити, що твердотільна модель створена на основі параметричної, може використовуватись в САЕ системах при проведенні перевірочних розрахунків та в САМ системах для отримання програм для верстатів з ЧПК.

Наведений розрахунок (розділ 3) та вибір за нормативними документами конструктивних параметрів дискової обкатної фрези найефективніше здійснюється при автоматизованому проектуванні з застосуванням сучасних програм розрахунку, 3D моделювання та отримання креслень цього інструменту.

5.8 Промислова перевірка результатів досліджень

Промисловою перевіркою результатів досліджень передбачались виробничі випробування запропонованого способу нарізування відрізних пил з нерівномірним кроком та перевірка результатів досліджень щодо автоматизованого проектування дискових обкатних фрез для обробки таких пил.

Теоретичними та експериментальними дослідженнями було показано, що спосіб обробки обкатними фрезами пил з нерівномірним кроком значно підвищує точність їх основних параметрів. До цих параметрів відносяться точність по кроку та допустимий радіус западини стружкових канавок. Виробничі випробування та автоматизоване проектування обкатних фрез здійснювалось на прикладі пил з дрібним зубом (тип 1).

В умовах ПАТ «Вінницький інструментальний завод» були виготовлені дві дискові обкатні фрези з кількістю зубів в групі $Z_0=4$ та $Z_0=6$ та нерівномірністю кроку $\Delta=30\%$ (Додаток Г).

Нарізувались відрізні пили діаметром $D=200\text{мм}$, товщиною $B=2,6\text{мм}$ з переднім кутом $\gamma=10^\circ$ та кількістю зубів $Z=96$. Обробка пил здійснювалась на зубофрезерному верстаті при перпендикулярній установці фрези відносно осі пили.

Параметри налаштування верстата: оберти шпинделя $n=1180\text{об/хв}$, осьова подача $S=0.25\text{мм/об}$, передаточне відношення $U=24$.

Було нарізано дві пили відповідно з $Z_{gr}=4$ та $Z_{gr}=6$, похибка за кроком яких не перевищувала $\pm 6'$ при нормі за ДСТУ ИСО 2768-1-2001 – $\pm 20'$. Радіус западин стружкових канавок у нарізуваних пил з нерівномірним кроком з $Z_{gr}=4$ лежало в межах $0.36 \pm 0,04\text{ мм}$ та для пил з $Z_{gr}=6$ – в межах $0.31 \pm 0,03\text{ мм}$, що повністю відповідає значенням рекомендованим стандартом.

На підприємстві ТОВ «Костянтинівський завод механічного обладнання» з використанням системи автоматизованого проектування дискових обкатних фрез в програмі SolidWorks побудована 3D модель обкатної фрези та створено креслення фрези $D_\phi=90\text{ мм}$ з числом зубів в групі $Z_{gr}=4$ та $\Delta=30\%$. В додатку Г наведена спроектована фреза, яка була виготовлена для подальших виробничих випробувань.

Нарізання пили здійснювалось на зубофрезерному верстаті за попередньо описаною методикою.

За результатами випробувань похибка за кроком не перевищувала $\pm 5'$, радіус западин стружкових канавок лежать в межах $0.35 \pm 0,04\text{ мм}$, що відповідає допустимому значенню за стандартом.

Алгоритм та програма для побудови 3D моделі обкатної фрези передані на виробництво.

Таким чином, проведені промислові випробування підтвердили результати розроблених теоретичних положень теорії формоутворення дискових обкатних фрез для обробки відрізних пил з різним значенням

кроку зубів по зовнішньому діаметру (нерівномірний крок), та рекомендацій що до розробки їх конструкції.

Результати роботи використовуються у навчальному процесі КПІ ім. Ігоря Сікорського при підготовці фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня магістр за спеціальністю «131 - прикладна механіка» та спеціалізацією «Інструментальні системи та технології формоутворення деталей» і використовуються при викладанні дисциплін «Теорія проектування інструменту» та «Автоматизоване проектування різального інструменту», а також в курсовому і дипломному проектуванні.

Висновки

Лабораторно-промислова перевірка результатів теоретичних досліджень підтвердили розроблену теорію проектування дискових обкатних фрез для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком.

Вперше розроблена методика проектування обкатних фрез з нерівномірним кроком, яка знайшла відображення в запропонованій схемі САПР.

Показано, що розроблені алгоритм та програма для створення параметричної моделі є основою побудови твердотільної 3D моделі для розробки виготовлення фрез в автоматизованому виробництві та для виготовлення креслень фрез.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Вперше на основі загальної теорії формоутворення поверхонь розроблена теорія проектування дискових обкатних фрез для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком в групі, яка полягає в визначенні:
 - координат точок різальних кромок фрези для нарізання зубів пил прямолінійного профіля при різних її установках відносно осі пили;
 - залежності для розрахунку мінімально допустимого діаметра фрези в залежності від конструктивних параметрів різальної частини відрізної пили;
 - установчих параметрів обкатної фрези відносно осі оброблюваної пили та радіусів перехідних кривих, що відповідають радіусам западин стружкових канавок фрези.
2. Показано, що кількість зубів дискових обкатних фрез, розташування їх різальних кромок та глибина стружкових канавок визначається кількістю зубів в групі з нерівномірним кроком та параметрами нерівномірності.
3. Вперше на прикладі обробки пил з дрібним зубом та нерівномірним кроком розроблена дискова обкатна фреза. При розробці конструкції визначені параметри нерівномірності кроків в групі. На основі дослідження характеру зміни мінімального допустимого діаметра фрези від конструктивних параметрів відрізної пили встановлені залежності для визначення зовнішнього діаметра фрези з урахуванням переточувань.
4. Встановлено, що на значення радіуса перехідних кривих в найбільшій мірі впливає кількість зубів пили, її діаметр та ширина.
5. Вперше отримані залежності для розрахунку геометричних параметрів зубів дискової обкатної фрези в процесі її роботи, які дозволяють визначати геометрію різальної кромки фрези в будь-якій точці і в довільний момент часу її роботи. На основі цих залежностей

встановлено, що кінематичні кути в нормальному перерізі вздовж різальної кромки залежать від числа зубів нарізуваного виробу, числа зубів в групі, переднього кута відрізної фрези та діаметра обкатної фрези.

6. Встановлено, що зміна передніх γ та задніх α кутів вздовж різальних кромок фрези носить прямо протилежних характер. При обробці різальною кромкою передньої поверхні пили кут γ збільшується і зменшується при обробці потиличної і навпаки – кут α зменшується при обробці передньої поверхні, досягаючи від’ємних значень та збільшується при обробці потиличної. Для забезпечення сприятливої геометрії вздовж різальних кромок в процесі роботи фрези $Z_0=4$ рекомендовано їх згачувати з різними нормальними кутами: $\alpha_{Nnp} = 15^\circ$ та $\alpha_{Nnt} = 5^\circ$.
7. Проведені лабораторні випробування при нарізанні зубів дрібнозубих дискових відрізних пил з нерівномірним кроком в групі підтвердили результати теоретичних досліджень. Показано, що точність за кроком оброблених дискових відрізних пил з нерівномірним кроком значно перевищує точність в порівнянні зі способами копіювання.
8. Вперше розроблена методика проектування обкатних фрез з нерівномірним кроком, яка знайшла відображення в запропонованій схемі САПР фрез. Показано, що розроблені алгоритм та програма для створення параметричної моделі є основою побудови 3D твердотільної моделі для розробки виготовлення фрез в автоматизованому виробництві та для виготовлення креслень фрез.
9. Результати промислової перевірки результатів досліджень проведені на виробництві ТОВ «Вінницькій інструментальний завод» та ТОВ «Костянтинівський завод механічного обладнання». В умовах Вінницького інструментального заводу були виготовлені дві фрези з $Z_0=4$ та $Z_0=6$ та нерівномірністю кроку $\Delta=30\%$, якими нарізані відрізні

пили. Похибка за кроком відрізних пил $D=200\text{мм}$ не перевищувала $\pm 6'$ при нормі за ДСТУ ИСО 2768-1-2001 – $\pm 20'$.

На підприємстві ТОВ «Костянтинівський завод механічного обладнання» з використанням алгоритму та програми автоматизованого проектування створено креслення фрези $D_{\phi}=90\text{ мм}$ з кількістю зубів в групі $Z_{gr}=4$ та $\Delta=30\%$ за якими виготовлена фреза. За результатами випробувань похибка за кроком нарізаних відрізних пил не перевищувала $\pm 5'$, радіус западин стружкових канавок лежать в межах $0.35 \pm 0,04\text{ мм}$, що відповідає допустимому значенню за стандартом.

СПИСОК БІБЛЮГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Бабенко А.Є., Равська Н.С., Боронко О.О., Парненко В.С. Про вплив на колювання фрези кута нахилу зубців. Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. Житомир, 2000. №12. С.49-54.
2. Бабенко А. Е., Равська Н.С., Боронко О.О. Влияние динамических характеристик дисковых пил на их работоспособность. Вестник НТУУ “КПИ”. Машиностроение. 2002. № 43.
3. Бабенко А. Е., Равська Н.С., Боронко О.О. Продольные колебания дисковой фрезы. Вестник НТУУ “КПИ”. Машиностроение. 2001. № 40. С. 347–353.
4. Бабенко А.Є., Боронко О.О., Парненко В.С. Вимушені колювання дискової фрези. Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. Житомир, 2001. №18. С. 28-32.
5. Бабенко А.Е., Боронко О.А., Лорох Р., Парненко В.С. Влияние наклона зубьев фрезы на ее динамические характеристики. II Міжнародна конференція: Прогресивна техніка і технологія – 2001. (м. Севастополь, 28 черв. - 2 лип. 2001). Київ – Севастополь. 2001. С.77.
6. Боронко О.О. Метод розрахунку вібраційних процесів машинобудівних конструкцій: дис. ... докт. техн. наук: 05.03.09. Київ, 2003. 267 с.
7. Васин С.А, Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материала. Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 447 с.
8. Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание металлов. М.: Высшая школа, 2009. 535с.
9. Василенко Н.В. Теория колебаний. Киев: Высшая школа, 1992. 430 с.
10. Глинський Я.М., Анохін В.Є., Рязька В.А. Бейсик. QBasic, Visual Basic і VBA. Львів, Деол, СПД Глинський, 2004. 160с.

11. ГОСТ 2679-93 (ИСО 2296-72). Фрезы прорезные и отрезные. Технические условия. Чиний від 1997.07.01. М.: Межгосударственный стандарт, 2010.
12. Головка Л. Ф., Лук'яненко С.О. Лазерні технології та комп'ютерне моделювання. К., Вістка, 2009. 296 с.
13. Грабченко А.Н., Кондусов Е.Б., Кривошея А.В., Равская Н.С., Родин П.Р. 3D-моделирование инструментов формообразования и схемы припуска при обработке резанием. Харьков, НТУ «ХТИ», 2001. 304с.
14. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985. 304 с.
15. Грабченко А.Н., Залога В.А., Внуков Ю.Н. и др. Интегрированные процессы обработки материалов резанием: учебник. Сумы, Университетская книга, 2007. 451с.
16. Гречишников В.А., Кирсанов Г.Н. и др. Автоматизированное проектирование металлорежущего инструмента. М.: Мосстанк., 1984, 109с.
17. Гречишников В.А. Системы автоматизированного проектирования режущих инструментов. М.: ВНИИТЭМР, сер.9.2, 52с.
18. Демидова Л.А., Пылькин А.Н. Программирование в среде Visual Basic for Applications: практикум. М., Горячая линия – Телеком, 2004. 175с.
19. ДСТУ 2249-93. Оброблення різанням. Терміни, визначення та позначення. Чинний від 01.01.1995. Київ: Держстандарт України, 1994. 55 с.
20. Залога В.О., Гончаров В.Д., Залога О.О. Сучасні інструментальні матеріали у машинобудуванні. Суми, Сумський державний університет, 2013. 371с.
21. Иноземцев Г.Г. Проектирование металлорежущих инструментов. М.: Машиностроение, 1984. 271 с.

22. Иноземцев Г. Г. Исследование зубообрабатывающих станков и инструментов и процессов. Межвуз. научн. сб. Саратов: изд-во Саратовского ин-та, 1992. 115 с.
23. Кожевников Д.В., Гречишников В.А., Кирсанов С.В., Кокарев В.И., Схиртладзе А.Г. Режущий инструмент: Учебник для вузов/ Под редакцией С.В. Кирсанова. 3-е изд. М.: Машиностроение, 2007. 528 с.
24. Копей В.Б., Онисько О. Р., Борушак Л. О., Роп'як Л. Я. Автоматизоване проектування різальних інструментів. Навчальний посібник. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. 208с.
25. Корн Г. Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Наука, 1970. 720 с.
26. Коротков И. А., Схиртладзе А. Г., Борискин В. П. Фрезерный инструмент. Старый Оскол: «ТНТ», 2014. 248с.
27. Кукляк М.Л. Металорізальні інструменти в машинобудуванні. Ч.1. К.:УСДО, 1993. 392с.
28. Кукляк М.Л. Металорізальні інструменти в машинобудуванні. Ч.2. К.:УСДО, 1993. 392с.
29. Кушнер В. С. Основы теории стружкообразования: Учебное пособие. В 2-х кн. Кн. 1: Механика резания. Омск : Изд-во ОмГТУ, 1996. 130 с.
30. Лашнев С.И. Формообразование зубчатых деталей реечными и червячными инструментами. Машиностроение 1971. 216с.
31. Лашнев С. И., Борисов А. Н., Емельянов С. Г. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими інструментами. Курск: КГТУ, 1997. 394 с.
32. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). Спб, Питер, 2004. 560с.
33. Лорох Р. Повышение работоспособности дисковых пил при отрезке круглых заготовок: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. Киев, 1998. 180 с.
34. Лоладзе Т.Н. Износ и точность режущего инструмента. М., Машиностроение, 1982. 320 с.

35. Мазур М.П. Внуков Ю. М. Залого В.О. Новосьолов Ю. К. Якубов Ф.Я. Основы теорії різання матеріалів: підручник. Львів: Новий світ, 2000. 422с.
36. Никулин Е. А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 560 с.
37. Одинцова А. С. Фасонные фрезы для обработки храповых колес методом обкатки: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. Киев, 1989. 208 с.
38. Одинцова А.С., Маламед Э.И. Фреза постоянной установки для обработки храповых колес. В сб. "Технология и организация производства", 1984 вып. 4. С.28-30.
39. Ординарцев И.А. Справочник инструментальщика. Л., Машиностроение. Ленингр. отд., 1987. 845 с.
40. Палей М. М., Дибнер Л. Г. Технология шлифования и заточки режущего інструмента. М., Машиностроение, 1988. 288 с.
41. Панкратов Ю.М. Профилирование обкатных инструментов. СПб.: Политехника-сервис, 2010. 158 с.
42. Панчук В.Г., Родін Р.П., Нощенко Н.О. Геометрія різальної частини відрізних фрез зі стружковими канавками змінної висоти. Вісник Житомирського державного технологічного університету, 2006. №1936. С.24-31.
43. Панчук В.Г. Теоретичні основи проектування відрізних фрез: дис. ... доктора техн. наук: 05.03.01. Киев, 2009. 360 с.
44. Парненко А.А. Профилирование обкаточной фрезы, обеспечивающей обработку прямозубых стружечных канавок без переходных кривых. Харьков, ХГПУ,
45. Парненко В.С. Расчет параметров впадин обкаточных дисковых фрез для изготовления пил с неравномерным шагом. Вестник Национального Технического Университета Украины "КПИ". 2014. №72.

46. Парненко В.С. Классификация изделий машиностроения прямолинейного пофиля зубьев. «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». Міжнародний збірник наукових праць Донецького Національного Технічного Університету. Донецьк, 2014. №2 (48). С.29-37
47. Парненко В.С. Методика розрахунку кута повороту інструменту другого порядку для отримання визначеного нахилу зубів оброблюваного інструмента. Загально-університетська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів, присвяченої дню Науки. Матеріали конференції. (м. Київ, 24 лют. 2014). Київ. 2014. С. 64-66.
48. Парненко В. С. Определение профиля зуба дисковой пилы, обрабатываемого дисковой обкаточной фрезой. Збірник наукових праць за матеріалами міжнародної науково-практичної конференції: "Інноваційні підходи і сучасна наука", м. Київ: 2015. 172с.
49. Парненко В.С. Определение формы режущей кромки обкаточной фрезы при взаимоперпендикулярных осях заготовки и инструмента. Сборник трудов XIX международной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике». (г. Новосибирск, 20 марта 2013). Новосибирск, 2013. С.39-46.
50. Парненко В. С., Равська Н. С., Охрименко О. А., Особливості виготовлення відрізних дискових фрез на зубофрезерному верстаті. Збірник матеріалів XIV міжнародної науково-технічної конференції "Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку". Краматорськ, 2016.
51. Парненко В.С., Равська Н.С. Визначення кінематичного переднього кута зуба дискової обкатної фрези для обробки багатозубих виробів з нерівномірним кроком. XVII Міжнародна науково-технічна конференція: Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта. (м. Одеса, 21 черв. 2016р.). Одеса. 2016. С.249-250.

52. Парненко В. С., Вовк В. В. Дослідження кінематичних геометричних параметрів передньої поверхні дискової обкатної фрези. Збірник наукових праць за матеріалами III міжнародної конференції «Наука і сучасність: виклики глобалізації». м. Київ. 2017. 172с.
53. Преимущества и недостатки плазменной резки. URL: <http://metalurg.su/preimushhestva-i-nedostatki-plazmennoj-rezki.html>. (дата звернення: 18.01.2018).
54. Равська Н. С. Основи кінематичної теорії визначення геометричних параметрів різальної частини інструменту. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. 2009. Випуск 24. с. 9-18.
55. Равская Н.С., Бабенко А.Є., Боронко О.А., Парненко В.С. Проектирование прогрессивных конструкций дисковых пил с неравномерным шагом зубьев. Донецкий государственный технический университет. Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Донецк, 2000. №13. С. 134-137.
56. Равская Н. С., Лорох Р. Особенности проектирования и изготовления дисковых отрезных пил с неравномерным шагом. Прогресивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва : міжнар. наук.-техн. конф., присвячена 100-річчю механіко-машинобудівного і 50-річчю зварювального факультетів: статті. К., 1998. Т. 1. С. 360–364.
57. Равська Н.С., Мельничук П.П., Касьянов А.Г., Родін Р.П. Технологія інструментального виробництва. ЖІТІ, 2001. 55с.
58. Равська Н.С., Родін П.Р., Ніколаєнко Т.П., Мельничук П.П. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці. Київ: Вид. СКД-Друк, 2013. 215 с.
59. Равська Н.С., Парненко В.С. Особливості заточки фасонних дискових обкатних фрез для обробки багатозубих виробів з нерівномірним кроком

- по задній поверхні. XV Міжнародна науково-технічна конференція: Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. (м. Краматорськ, 30 трав. – 1 черв. 2017 р.). Краматорськ. 2017. С.72-73.
60. Равська Н.С., Парненко В.С. Дослідження геометрії задньої поверхні різальної частини дискових обкатних фрез з нерівномірним кроком. Науковий журнал «Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки». Київ, 2018. Том 29 (68). № 2. С.21-31.
 61. Равська Н.С., Ковальова Л. І., Охріменко О. А., Вовк В. В. Звіт про науково-дослідну роботу «Узагальнена теорія визначення геометричних параметрів різального інструменту» Виконаний по темі № 2914ф. Київ, НТУУ КПІ, 2008. 208с (рукопис).
 62. Равская Н. С., Семенов А. В. Экспериментальные исследования процесса отрезки дисковыми пилами с неравномерным шагом зубьев. Резание и инструмент в технологических системах. 1999. Вып. 53. С. 144–145.
 63. Равська Н. С., Парненко В.С. Визначення статичних передніх і задніх кутів фасонної обкатної фрези у вершинної точки її ріжучої кромки. Збірник наукових праць. «Перспективні технології та прилади». Луцьк, 2016. №8. с95-97.
 64. Равська Н.С., Парненко В.С., Родін Р. П. Обкочувальна фреза для нарізування дискових пил з нерівномірним кроком зубів. Патент на корисну модель UA 106173, Опублік. 25.04.2016.
 65. Равська Н. С. Дослідження багатозубих інструментів з застосуванням 3D проектування. Вісник ДДМА. Збірник наукових праць. 2014. №2(33), С.54-59.
 66. Равская Н. С., Бабенко А.Є., Боронко О.А. Оценка конструкции дисковых пил по критерию их динамического состояния. Вестник НТУУ “КПИ”. Машиностроение. 2000. Вып. 39. С. 14–18.

67. Равская Н. С., Бабенко А.Є., Боронко О.А., Лорох Р. Определение критерия динамического состояния дисковой пилы. Вестник НТУУ "Киевский политехнический институт". Машиностроение. 1998. Вып. 33. С. 157–162.
68. Равська Н.С. Парненко В.С., Родін Р. П. Спосіб нарізування дискових пил з нерівномірним кроком зубів. Патент на корисну модель UA 104229, Опублік. 25.01.2016.
69. Равська Н.С., Парненко В.С. Визначення мінімального допустимого діаметра дискової обкатної фрези при обробці відрізних пил з нерівномірним кроком. Збірник наукових праць. «Перспективні технології та прилади». Луцьк, 2018. №9. С.98-104.
70. Равська Н.С., Охріменко А.О. Визначення швидкості різання при різних кінематичних схемах. Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Збірник наукових праць. Вип. №8. Житомир, 2010. с138-162.
71. Равська Н. С., Охріменко О. А., Майданюк С. В. Визначення параметрів зрізуваного шару багатозубих дискових інструментів та торцевих фрез за допомогою комп'ютерних систем 3D проектування. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. 2013. №32. С.20-29.
72. Режущий инструмент. Проектирование, производство, эксплуатация. URL:<http://rezh-instrument.ru/proizvodstvo-rezhushchikh-instrumentov/>. (дата звернення: 26.02.2018).
73. Родин П.Р. Основы проектирования режущих инструментов. К.: Вища школа, 1990. 424с.
74. Родин П.Р. Основы формообразования поверхностей резанием. К.: Вища школа. Головное изд-во, 1977. 192с.
75. Родин П.Р. Металлорежущие инструменты. К.: Вища школа. Головное изд-во, 1986. 455 с.

76. Родин П. Р., Равская Н. С., Бабенко А. Е., Боронко О. А.. Дисковые пилы с неравномерным шагом: монография. К.: НТУУ "КПИ", 2008. 216 с.
77. Родин П.Р., Одинцова А. С. Профиль фрезы постоянной установки для обработки зубчатых изделий на зубофрезерных станках. Сб. "Резание и инструмент". 1985. №. 33, с.62-64.
78. Родин П.Р. Одинцова А. С. Дисковые фасонные фрезы для нарезания храповых колес методом обкатки. Тезисы доклада на научно-технической конференции молодых ученых и специалистов "Актуальные проблемы в области машиностроения, радиоэлектроники, автоматики и вычислительной техники, теплоэнергетики и промышленной технологии". Киев, 1988. с.7-8.
79. Родин П.Р. Одинцова А. С. Дисковые угловые фрезы для обработки храповых колес методом обкатки. Сб. "Резание и инструмент", 1988, №. 40, с.3-7.
80. Родин П.Р., Одинцова А.С., Олифиренко М.И. Способ нарезания храповых колес и дисковая угловая фреза для его осуществления. А.С. № 1373501, Б.И. № 6, 1988, с.38.
81. Родин П.Р., Климов В.И., Якубсон С.Б. Технология изготовления зуборезного инструмента. К.: Техніка, 1982. 334 с.
82. Родин П.Р., Одинцова А.С. Исходные поверхности фрез постоянной установки при обработке плоскостей на зубофрезерных станках. Киев, 1983. Рукопись депонирована в УКРНИИНТИ.
83. Розенберг Ю.А. Різання матеріалів: підручник [для студентів технічних вузів]. Курган, ВАТ "Поліграфічний комбінат" Зауральє, 2007. 294с.
84. Саленко О.Ф. Загірняк О.В., Формовська В.Г., Доценко В.Г., Щетинін В.Г. Процеси і обладнання струмино-лазерного різання. Харків,
85. Сахаров Г.Н. Определение параметров обкаточных инструментов, работающих с профилированием по переходной кривой. 1972.

86. Сахаров Г.Н. Обкаточные инструменты. М.: Машиностроение, 1983. 223 с.
87. Сахаров Г.Н. Арбузов О.Б., Боровой Ю.Л. Гречишников В.А., Киселев А.С. Metallорежущие инструменты: учебник. М.: машиностроение, 1989. 328с.
88. Семенов А. В. Разработка дисковых пил с неравномерным шагом: дис. ...канд. техн. наук : 05.03.01. К., 1998. 194 с.
89. Семенченко И.И., Матюшин В.М., Сахаров Г.Н. Проектирование металлорежущих инструментов. М.: Машгиз, 1962. 952 с.
90. Соломенцев Ю.М., Гречишников В.А. и др. Инструментальные системы автоматизированного производства: учебник.
91. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. /Под. Ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. 5-е изд., перераб. И доп. М.: Машиностроение, 2001. 912 с.
92. Струтинский В.В., Грицай І.Е., Сліпчук А.М. Обладнання та прогресивні методи формоутворення деталей: навчальний посібник. Львів, Львівська політехніка, 2012. 340 с.
93. Тику Ш. Эффективная работа: SolidWorks 2004. Спб., Питер, 2005. 768с.
94. Трент Е.М. Резание металлов. М., Машиностроение, 1982. 163 с.
95. Филиппов Г.Р. Режущий инструмент. Л., Машиностроение, 1981. 392 с.
96. Фролов К.В., Попов С.А., Мусатов А.К. и др. Теория механизмов и машин: Учеб. для втузов. М., Высш. Шк., 1987. 496 с.
97. Шавлюга Н. И. Расчет и примеры наладок зубофрезерных и зубодолбежных станков. Л., Машиностроение, 1978. 165с.
98. Шагун В.И. Режущий инструмент: Проектирование. Производство. Эксплуатация: учебн. пособие. Мн.: НПООО «ПИОН», 2002. 496 с.
99. Шепелева Г.И. Теория формообразования и контакта движущихся тел. М.: Станкин, 1999. 494 с.

100. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания. Минск. Новое знание, 2006. 512с.
101. Altintas Y. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. Cambridge University Press, 2000. 286 p.
102. Altintas Y., Engin S. Generalized modeling of mechanics and dynamics of milling cutters. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2001. Vol. 50. Issue 1. P. 25-30.
103. Balachandran B. Nonlinear dynamics of milling processes. Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences. London, 2001. Vol. 359. P. 793–819.
104. Bayoumi A. E., Yucsan G., Hutton D. V. On the closed form mechanistic modeling of milling: specific Cutting energy, torque, and power. Journal of Materials Engineering and Performance, 1994. Vol. 3(1) P. 151–158.
105. Brandon C. Gegg, Albert C.J. Luo, C. Steve Suh. Machine Tool Vibrations and Cutting Dynamics. Springer Science & Business Media, 2011. 179p.
106. BLECHER GmbH & Co. URL:
<https://www.blecher.com/products/tungsten-carbide-tipped-circular-saw-blades-for-steel-cutting/>. (Last accessed: 22.03.2018).
107. Chang Wen-Tung, Chen Li-Cheng. Design and experimental evaluation of a circular saw blade with self-clamped cutting inserts. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016, Volume 83, Issue 1–4, P. 365–379
108. Chryssolouris G.. Laser Machining Theory and Practice. Springer-Verlag New York Inc, 2013. 274p.
109. Droba1Adam, Svoreň1 Ján, Marienčík Ján. The shapes of teeth of circular saw blade and their influence on its critical rotational speed. Acta universitatis agriculturae et silviculturae mendelianae brunensis. Volume 63, 2015. P.399-403

110. Grzesik Wit. Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling and Applications. Elsevier, 2008. 472p.
111. JULIA UTENSILI SPA. URL: https://www.juliautensili.com/wp-content/uploads/2018/10/HSS_CATALOGUE_Edition-2018_2.pdf. (Last accessed: 09.09.2018).
112. Hutton S. G., Lee V., Kirbach E. Effect of tooth front bevel angle on cutting accuracy and chip formation for circular rip saws. Berlin: Springer, 1992. Vol. 50. № 7–8. P. 313–316.
113. Karnasch Professional Tools GmbH. URL: <https://karnasch.tools/en/catalog/gk31-main-catalog> (Last accessed: 09.09.2018).
114. Kinkelder BV. URL: <https://kinkelder.com/saw-blades/hss-standard/>. (Last accessed: 22.03.2018)
115. Nishio S, Marui E. Effects of slots on the lateral vibration of a circular saw blade. Int J Mach Tools Manuf 36(7), 1996. P.771–787
116. Patrikalakis Nicholas M., Maekawa Takashi. Shape Interrogation for Computer Aided Design And Manufacturing. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. 419p.
117. Prakash Mahadeo Dixit, U.S. Dixit. Modeling of Metal Forming and Machining Processes: by Finite Element and Soft Computing Methods. Springer Science & Business Media, 2008. 590p.
118. Ranganath B.J.. Thermal Metal Cutting Processes. I.K. International Publishing House Pvt. Limited, 2008. 164p.
119. Stark. HSS Circular Saws: каталог. GMV-Grafiche Marini Villorba, 2017. 27 s.
120. Stephenson David A., Agapiou John S. Metal Cutting Theory and Practice 3rd Edition. CRC Press, 2016. 969 p.

121. Tate C. The fundamentals of industrial sawing. URL: <https://www.ctemag.com/news/articles/fundamentals-industrial-sawing> (Last accessed: 09.06.2018)
122. Vara Prasada Rao K. Manufacturing Science And Technology- Manufacturing Processes And Machine Tools. New Age International, 2009. 400p.
123. Vertriebsgesellschaft STARK GmbH & Co. Catalogue. URL: http://www.starktools.com/sites/503250bb96803b6018000004/theme/pdfs/pdfs/Catalogo_Metal_Cutting_2018_LOW.pdf. (Last accessed: 22.03.2018).
124. Williston Ed M. Saws: Design, Selection, Operation, Maintenance. Miller Freeman Publications, 1989. 450p.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Розрахункові радіуси заокруглення перехідних кривих для западини зуба відрізної пили з мінімальним кутовим кроком, при $\Delta=30\%$ та $\gamma=5^\circ$

Загальна кількість зубів Z			48	60	72	84	96	108	120	132	144	156	168	180	192	204	
Параметри пили			Радіуси заокруглення перехідних кривих при обробці западини зуба обкатною фрезою розрахункового зовнішнього діаметра														
Число зубів у групі, Z _{гр}	Діаметр, D, мм	Товщина, B, мм															
4	200	1,8	0,81	0,68	0,58	0,51	0,46	0,42	0,39								
		2,5	0,84	0,71	0,61	0,54	0,49	0,45	0,42	0,40							
6		1,8	0,63	0,51	0,44	0,38											
		2,5	0,64	0,53	0,45	0,40											
4	250	1,8	1,00	0,83	0,71	0,62	0,56	0,50	0,46	0,43	0,40						
		2,5	1,02	0,85	0,73	0,65	0,58	0,53	0,49	0,46	0,44	0,41	0,39				
6		1,8	0,78	0,64	0,54	0,47	0,42	0,38									
		2,5	0,79	0,65	0,55	0,48	0,43	0,39									
4	315	1,8	1,24	1,03	0,87	0,77	0,68	0,62	0,57	0,52	0,48						
		2,5	1,27	1,05	0,90	0,79	0,71	0,64	0,59	0,55	0,52	0,49					
6		1,8	0,97	0,79	0,67	0,59	0,52	0,47									
		2,5	0,98	0,80	0,68	0,60	0,53	0,48									

Таблиця А.2 – Рекомендовані зовнішні діаметри обкатної фрези для обробки зубів з радіусами западин, розміри яких лежать в межах нормованих, при установці осі фрези перпендикулярно до осі пили при $\Delta=30\%$ та $\gamma=5^\circ$

Число зубів у групі, Z_{gr}	Діаметр, D, мм	Товщина, В, мм	Рекомендований зовнішній діаметр обкатної фрези D_f для обробки відрізних пил за наступними параметрами при перпендикулярній установці її осі													
Загальна кількість зубів Z			48	60	72	84	96	108	120	132	144	156	168	180	192	204
4	200	1,8	186	124	90	68	56	48	46	43	40	37	34	32	30	28
		2,5	192	130	94	71	58	52	48	43	40	37	34	32	30	28
6		1,8	508	338	242	190	166	147	133	121	111	102	95	89	83	78
		2,5	520	346	248	190	166	147	133	121	111	102	95	89	83	78
4	250	1,8	350	234	168	126	100	82	68	58	50	46	43	40	37	36
		2,5	360	240	174	132	106	86	70	60	54	48	43	40	37	36
6		1,8	780	518	368	276	216	184	166	151	138	128	119	111	104	98
		2,5	796	528	376	284	222	184	166	151	138	128	119	111	104	98
4	315	1,8	440	294	210	158	124	100	84	70	62	58	53	50	47	45
		2,5	450	300	216	164	128	104	88	74	64	58	53	50	47	45
6		1,8	988	652	462	346	270	232	209	190	174	161	149	139	131	123
		2,5	1000	660	470	354	276	232	209	190	174	161	149	139	131	123

Таблиця А.3 – Розрахункові радіуси заокруглення перехідних кривих для западини зуба відрізної пили з мінімальним кутовим кроком, при $\Delta=30\%$ та $\gamma=10^\circ$

Загальна кількість зубів Z			48	60	72	84	96	108	120	132	144	156	168	180	192	204
Параметри пили			Радіуси заокруглення перехідних кривих при обробці западини зуба обкатною фрезою розрахункового зовнішнього діаметра													
Число зубів у групі, Z _{гр}	Діаметр, D, мм	Товщина, B, мм														
4	200	1,8	0,91	0,75	0,65	0,57	0,51	0,47	0,43	0,40	0,38	0,36				
		2,5	0,94	0,78	0,68	0,60	0,55	0,50	0,47	0,44	0,42	0,40				
6		1,8	0,73	0,57	0,49	0,43	0,38									
		2,5	0,74	0,59	0,50	0,44	0,40									
4	250	1,8	1,12	0,92	0,79	0,69	0,62	0,56	0,51	0,48	0,45	0,42	0,40			
		2,5	1,14	0,95	0,82	0,72	0,65	0,59	0,55	0,51	0,48	0,46	0,44	0,42	0,41	0,39
6		1,8	0,87	0,71	0,60	0,52	0,47	0,42	0,38							
		2,5	0,88	0,72	0,62	0,54	0,48	0,43	0,40							
4	315	1,8	1,39	1,14	0,97	0,85	0,76	0,68	0,63	0,58	0,54	0,50				
		2,5	1,42	1,17	1,00	0,88	0,79	0,72	0,66	0,61	0,57	0,54	0,51	0,49		
6		1,8	1,08	0,89	0,75	0,65	0,58	0,52	0,47							
		2,5	1,10	0,90	0,76	0,66	0,59	0,53	0,49							

Таблиця А.4 – Рекомендовані зовнішні діаметри обкатної фрези для обробки зубів з радіусами западин, розміри яких лежать в межах нормованих, при установці осі фрези перпендикулярно до осі пили при $\Delta=30\%$ та $\gamma=10^\circ$

Число зубів у групі, Z_{gr}	Діаметр, D, мм	Товщина, B, мм	Рекомендований зовнішній діаметр обкатної фрези D_f для обробки відрізних пил за наступними параметрами при перпендикулярної установці її осі													
Загальна кількість зубів Z			48	60	72	84	96	108	120	132	144	156	168	180	192	204
4	200	1,8	230	154	110	84	66	54	44	40	36	32	30	28	26	25
		2,5	240	162	116	88	70	58	48	42	36	32	30	28	26	25
6		1,8	500	332	236	176	146	128	116	106	98	90	84	78	73	69
		2,5	510	340	240	180	146	128	116	106	98	90	84	78	73	69
4	250	1,8	346	230	164	124	100	80	66	56	48	42	38	36	34	32
		2,5	360	240	172	130	104	84	70	60	52	46	40	36	34	32
6		1,8	776	512	360	269	210	170	146	134	122	112	104	98	92	86
		2,5	782	519	368	275	214	173	146	134	122	112	104	98	92	86
4	315	1,8	436	290	206	156	122	98	82	70	60	54	48	44	42	40
		2,5	446	298	212	160	126	102	86	72	62	54	48	44	42	40
6		1,8	978	644	456	340	264	212	184	168	154	142	132	124	116	108
		2,5	994	652	460	345	268	216	184	168	154	142	132	124	116	108

Таблиця А.5 – Розрахункові глибини та діапазон їх допустимих значень для канавок зубів пили $Z_{gr}=4$ з мінімальним кутовим кроком у групі

Діаметр, D мм	Передній кут, γ	Δ	Z	48	60	72	84	96	108	120	132	144	156	168	180	192	204
200	10°	30%	ε_{min}	5,25	4,20	3,50	3,00	2,63	2,33	2,10	1,91	1,75	1,62	1,50	1,40	1,31	1,24
		20%	ε_{min}	6,00	4,80	4,00	3,43	3,00	2,67	2,40	2,18	2,00	1,85	1,71	1,60	1,50	1,41
		30%	$h_{роз}$	4,01	3,14	2,57	2,18	1,98	1,67	1,50	1,36	1,24	1,14	1,06	0,98	0,92	0,86
			h_{max}	4,15	3,27	2,71	2,31	2,02	1,80	1,62	1,48	1,36	1,26	1,18	1,10	1,04	0,98
			h_{min}	3,87	3,00	2,44	2,05	1,77	1,55	1,37	1,23	1,12	1,02	0,93	0,86	0,80	0,74
		20%	$h_{роз}$	4,65	3,63	2,97	2,52	2,18	1,93	1,72	1,56	1,42	1,31	1,21	1,13	1,06	0,99
			h_{max}	4,80	3,77	3,11	2,65	2,31	2,05	1,85	1,68	1,55	1,43	1,33	1,25	1,18	1,11
			h_{min}	4,51	3,49	2,84	2,39	2,05	1,80	1,60	1,43	1,30	1,19	1,09	1,01	0,93	0,87
	5°	30%	$h_{роз}$	4,89	3,84	3,16	2,69	2,34	2,07	1,85	1,68	1,53	1,41	1,31	1,22	1,14	1,07
			h_{max}	5,06	4,00	3,32	2,85	2,49	2,22	2,01	1,83	1,69	1,56	1,46	1,37	1,29	1,22
			h_{min}	4,72	3,68	3,00	2,53	2,18	1,91	1,70	1,53	1,38	1,26	1,16	1,07	0,99	0,92
		20%	$h_{роз}$	5,65	4,43	3,65	3,09	2,69	2,38	2,13	1,93	1,76	1,62	1,50	1,40	1,31	1,23
			h_{max}	5,83	4,60	3,81	3,25	2,85	2,53	2,28	2,08	1,91	1,77	1,65	1,55	1,46	1,38
			h_{min}	5,48	4,27	3,48	2,94	2,53	2,22	1,97	1,77	1,61	1,47	1,35	1,25	1,16	1,08
250	10°	30%	$h_{роз}$	5,01	3,92	3,22	2,73	2,37	2,08	1,87	1,69	1,55	1,42	1,32	1,23	1,15	1,08
			h_{max}	5,19	4,09	3,38	2,89	2,53	2,25	2,03	1,85	1,70	1,58	1,47	1,38	1,30	1,23
			h_{min}	4,83	3,75	3,05	2,57	2,21	1,93	1,72	1,54	1,39	1,27	1,17	1,08	1,00	0,93
		20%	$h_{роз}$	5,81	4,54	3,72	3,15	2,73	2,41	2,15	1,95	1,78	1,64	1,51	1,41	1,32	1,24
			h_{max}	6,00	4,71	3,89	3,31	2,89	2,57	2,31	2,11	1,93	1,79	1,67	1,56	1,47	1,39
			h_{min}	5,63	4,36	3,55	2,98	2,57	2,25	2,00	1,79	1,62	1,48	1,36	1,26	1,17	1,09
	5°	30%	$h_{роз}$	6,11	4,80	3,95	3,36	2,92	2,58	2,31	2,10	1,92	1,77	1,64	1,52	1,43	1,34
			h_{max}	6,32	5,01	4,15	3,56	3,12	2,78	2,51	2,29	2,11	1,95	1,82	1,71	1,61	1,53
			h_{min}	5,90	4,60	3,75	3,16	2,73	2,39	2,12	1,91	1,73	1,58	1,45	1,34	1,24	1,16
		20%	$h_{роз}$	7,07	5,54	4,56	3,87	3,36	2,97	2,66	2,41	2,20	2,03	1,88	1,75	1,64	1,54
			h_{max}	7,28	5,75	4,76	4,07	3,56	3,16	2,85	2,60	2,39	2,22	2,07	1,94	1,82	1,72

Діаметр, D мм	Передній кут, γ	Δ	Z	48	60	72	84	96	108	120	132	144	156	168	180	192	204
		30%	ε_{\min}	5,25	4,20	3,50	3,00	2,63	2,33	2,10	1,91	1,75	1,62	1,50	1,40	1,31	1,24
		20%	ε_{\min}	6,00	4,80	4,00	3,43	3,00	2,67	2,40	2,18	2,00	1,85	1,71	1,60	1,50	1,41
			h_{\min}	6,85	5,33	4,35	3,67	3,16	2,77	2,47	2,22	2,01	1,84	1,69	1,56	1,45	1,35
315	10°	30%	$h_{\text{роз}}$	6,31	4,94	4,05	3,44	2,98	2,63	2,36	2,13	1,95	1,79	1,66	1,55	1,45	1,39
			h_{\max}	6,53	5,15	4,26	3,64	3,18	2,83	2,56	2,33	2,14	1,99	1,85	1,74	1,64	1,55
			h_{\min}	6,09	4,73	3,85	3,23	2,78	2,44	2,16	1,94	1,76	1,60	1,47	1,36	1,26	1,17
		20%	$h_{\text{роз}}$	7,33	5,72	4,68	3,97	3,44	3,03	2,71	2,45	2,24	2,06	1,91	1,78	1,66	1,56
			h_{\max}	7,56	5,94	4,90	4,17	3,64	3,23	2,91	2,65	2,44	2,26	2,10	1,97	1,85	1,75
			h_{\min}	7,10	5,50	4,47	3,76	3,23	2,83	2,52	2,26	2,05	1,87	1,72	1,59	1,47	1,56
	5°	30%	$h_{\text{роз}}$	7,70	6,05	4,98	4,23	3,68	3,25	2,92	2,64	2,42	2,22	2,06	1,92	1,80	1,72
			h_{\max}	7,96	6,31	5,23	4,48	3,93	3,50	3,16	2,88	2,65	2,46	2,30	2,16	2,03	1,92
			h_{\min}	7,43	5,79	4,73	3,99	3,44	3,01	2,68	2,40	2,18	1,99	1,83	1,69	1,56	1,46
		20%	$h_{\text{роз}}$	8,90	6,98	5,74	4,87	4,23	3,74	3,35	3,03	2,77	2,55	2,36	2,20	2,06	1,94
			h_{\max}	9,18	7,25	6,00	5,13	4,48	3,99	3,59	3,28	3,01	2,79	2,60	2,44	2,30	2,17
			h_{\min}	8,63	6,72	5,49	4,62	3,99	3,50	3,11	2,79	2,53	2,31	2,13	1,97	1,83	1,70

Таблиця А.6 – Розрахункові глибини та діапазон їх допустимих значень для канавок зубів пили $Z_{gr}=6$ з мінімальним кутовим кроком у групі

Діаметр, D мм	Передній кут, γ	30%	ε_{min}	4,13	3,30	2,75	2,36	2,06	1,83	1,65	1,50	1,38	1,27	1,18	1,10	1,03	0,97
		20%	ε_{min}	5,25	4,20	3,50	3,00	2,63	2,33	2,10	1,91	1,75	1,62	1,50	1,40	1,31	1,24
200	10°	30%	$h_{роз}$	3,07	2,42	1,99	1,69	1,47	1,30	1,16	1,06	0,96	0,89	0,82	0,77	0,72	0,67
			h_{max}	3,21	2,55	2,12	1,82	1,59	1,42	1,29	1,18	1,09	1,01	0,94	0,89	0,84	0,79
			h_{min}	2,94	2,29	1,86	1,56	1,35	1,18	1,04	0,93	0,84	0,77	0,70	0,65	0,60	0,56
		20%	$h_{роз}$	4,01	3,14	2,57	2,18	1,89	1,67	1,50	1,36	1,24	1,14	1,06	0,98	0,92	0,86
			h_{max}	4,15	3,27	2,71	2,31	2,02	1,80	1,62	1,48	1,36	1,26	1,18	1,10	1,04	0,98
			h_{min}	3,87	3,00	2,44	2,05	1,77	1,55	1,37	1,23	1,12	1,02	0,93	0,86	0,80	0,74
	5°	30%	$h_{роз}$	3,77	2,97	2,45	2,09	1,82	1,61	1,44	1,31	1,20	1,10	1,02	0,95	0,89	0,84
			h_{max}	3,93	3,13	2,61	2,24	1,97	1,76	1,59	1,46	1,35	1,25	1,17	1,10	1,04	0,99
			h_{min}	3,60	2,81	2,30	1,93	1,67	1,46	1,29	1,16	1,05	0,95	0,87	0,81	0,75	0,69
		20%	$h_{роз}$	4,89	3,84	3,16	2,69	2,34	2,07	1,85	1,68	1,53	1,41	1,31	1,22	1,14	1,07
			h_{max}	5,06	4,00	3,32	2,85	2,49	2,22	2,01	1,83	1,69	1,56	1,46	1,37	1,29	1,22
			h_{min}	4,72	3,68	3,00	2,53	2,18	1,91	1,70	1,53	1,38	1,26	1,16	1,07	0,99	0,92
250	10°	30%	$h_{роз}$	3,84	3,02	2,49	2,11	1,84	1,62	1,46	1,32	1,21	1,11	1,03	0,96	0,90	0,84
			h_{max}	4,01	3,18	2,65	2,27	1,99	1,78	1,61	1,47	1,36	1,26	1,18	1,11	1,05	0,99
			h_{min}	3,67	2,86	2,33	1,96	1,68	1,47	1,30	1,17	1,06	0,96	0,88	0,81	0,75	0,70
		20%	$h_{роз}$	5,01	3,92	3,22	2,73	2,37	2,09	1,87	1,69	1,55	1,42	1,32	1,23	1,15	1,08
			h_{max}	5,19	4,09	3,38	2,89	2,53	2,25	2,03	1,85	1,70	1,58	1,47	1,38	1,30	1,23
			h_{min}	4,83	3,75	3,05	2,57	2,21	1,93	1,72	1,54	1,39	1,27	1,17	1,08	1,00	0,93
	$\gamma=5^\circ$	30%	$h_{роз}$	4,71	3,71	3,07	2,61	2,27	2,01	1,80	1,64	1,50	1,38	1,28	1,19	1,12	1,05
			h_{max}	4,91	3,91	3,26	2,80	2,46	2,20	1,99	1,82	1,68	1,56	1,46	1,38	1,30	1,23
			h_{min}	4,51	3,52	2,87	2,42	2,08	1,82	1,62	1,45	1,31	1,19	1,09	1,01	0,93	0,87
		20%	$h_{роз}$	6,11	4,80	3,95	3,36	2,92	2,58	2,31	2,10	1,92	1,77	1,64	1,52	1,43	1,34
			h_{max}	6,32	5,01	4,15	3,56	3,12	2,78	2,51	2,29	2,11	1,95	1,82	1,71	1,61	1,53
			h_{min}	5,90	4,60	3,75	3,16	2,73	2,39	2,12	1,91	1,73	1,58	1,45	1,34	1,24	1,16

Діаметр, D мм	Передній кут, γ	30%	ε_{\min}	4,13	3,30	2,75	2,36	2,06	1,83	1,65	1,50	1,38	1,27	1,18	1,10	1,03	0,97
		20%	ε_{\min}	5,25	4,20	3,50	3,00	2,63	2,33	2,10	1,91	1,75	1,62	1,50	1,40	1,31	1,24
315	10°	30%	$h_{\text{роз}}$	4,84	3,81	3,13	2,66	2,31	2,05	1,83	1,66	1,52	1,40	1,30	1,21	1,13	1,06
			h_{max}	5,06	4,01	3,34	2,86	2,51	2,24	2,03	1,85	1,71	1,59	1,49	1,40	1,32	1,25
			h_{\min}	4,63	3,60	2,93	2,46	2,12	1,85	1,64	1,47	1,33	1,21	1,11	1,02	0,94	0,88
		20%	$h_{\text{роз}}$	6,31	4,94	4,05	3,44	2,98	2,63	2,36	2,13	1,95	1,79	1,66	1,55	1,45	1,36
			h_{max}	6,53	5,15	4,26	3,64	3,18	2,83	2,56	2,33	2,14	1,99	1,85	1,74	1,64	1,55
			h_{\min}	6,09	4,73	3,85	3,23	2,78	2,44	2,16	1,94	1,76	1,60	1,47	1,36	1,26	1,17
	5°	30%	$h_{\text{роз}}$	5,93	4,68	3,86	3,29	2,86	2,53	2,27	2,06	1,89	1,74	1,61	1,50	1,41	1,32
			h_{max}	6,19	4,93	4,11	3,53	3,10	2,77	2,51	2,30	2,12	1,97	1,84	1,73	1,64	1,55
			h_{\min}	5,68	4,43	3,62	3,05	2,62	2,30	2,04	1,83	1,65	1,50	1,38	1,27	1,17	1,09
		20%	$h_{\text{роз}}$	7,70	6,05	4,98	4,23	3,68	3,25	2,92	2,64	2,42	2,22	2,06	1,92	1,80	1,69
			h_{max}	7,96	6,31	5,23	4,48	3,93	3,50	3,16	2,88	2,65	2,46	2,30	2,16	2,03	1,92
			h_{\min}	7,43	5,79	4,73	3,99	3,44	3,01	2,68	2,40	2,18	1,99	1,83	1,69	1,56	1,46

ДОДАТОК Б

Свідоцтва про реєстрацію авторських прав



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **104229** (13) **U**
(51) МПК (2016.01)
B23F 5/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2015 02233	(72) Винахідник(и): Равська Наталія Сергіївна (UA), Парненко Валерія Сергіївна (UA), Родін Родіон Петрович (UA)
(22) Дата подання заявки: 13.03.2015	
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.01.2016	(73) Власник(и): НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ "КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ", пр. Перемоги, 37, м. Київ-56, 03056 (UA)
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.01.2016, Бюл.№ 2	

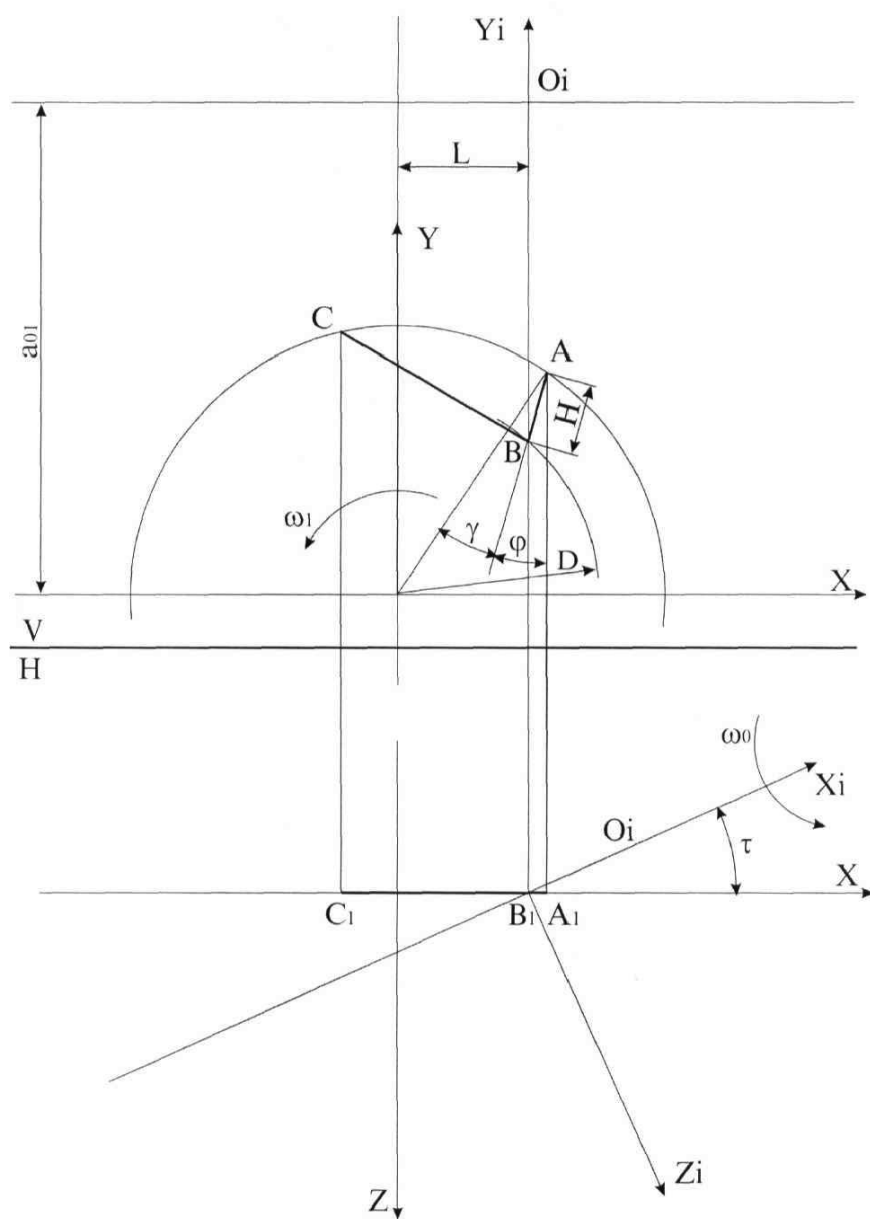
(54) СПОСІБ НАРІЗУВАННЯ ДИСКОВИХ ПИЛ З НЕРІВНОМІРНИМ КРОКОМ ЗУБІВ

(57) Реферат:

Корисна модель належить до металообробки, а конкретно, до інструментального виробництва, і призначена для попередньої обробки дискових багатозубих заготовок з нерівномірним кроком зубів. Обробку обкочувальною фрезою зубів дискової пили здійснюють при повороті на кутовий крок бічних ріжучих кромок зубів обкочувальної фрези, які формують передню поверхню зубів на заготовці. При цьому осі фрези та пили схрещують під певним кутом. У процесі зубонарізування кожен зуб інструменту обробляє западину зуба на заготовці, яка відповідає своєму кроку в групі.

UA 104229 U

UA 104229 U



UA 104229 U

Корисна модель належить до металообробки, а конкретно, до інструментального виробництва, і призначена для попередньої обробки дискових багатозубих заготовок з нерівномірним кроком зубів.

Відомий патент № 14913 У країни МПК В23F 5/00 (МПК В23F 9/00) "Спосіб обробки багатозубих деталей фасонною обкатною фрезою" опублікований 15.08.2006 р. Спосіб полягає в тому, що фасонною обкатною фрезою обробляють багатозубі деталі, причому вісь фрези розміщують під певним кутом стосовно осі оброблюваної деталі.

Недоліком цього способу є те, що за допомогою нього неможливо обробляти дискові багатозубі деталі, які мають передні кути, а також багатозубі деталі з нерівномірним кроком зубів.

Найбільш близькою до запропонованої корисної моделі технічною суттю та ефектом, що досягається, є спосіб нарізування храпових коліс А.С. СРСР № 1373501, В 23 F 5/12 "Способ нарезания храповых колес и дисковая угловая фреза для его осуществления", опубл. 15.02.1988 р. Нарізування храпових коліс здійснюють дисковою кутовою фрезою при взаємному обкатному русі колеса і фрези. При цьому фрезу встановлюють під кутом по відношенню до торцевої площини колеса, а передня поверхня зуба фрези нахилена до основної площини під переднім кутом.

Недоліком відомого способу є те, що за допомогою нього неможливо обробляти зубчасті заготовки з нерівномірним кроком зубів.

В основу корисної моделі поставлена задача вдосконалення способу нарізування зубчастих заготовок з нерівномірним кроком зубів обкочувальною фрезою, що також дозволить обробляти дискові пили з нерівномірним кроком.

Задачею корисної моделі є підвищення точності і продуктивності обробки зубчастих заготовок з нерівномірним кроком зубів з використанням методу обкатки.

Спосіб обробки обкочувальною фрезою зубів дискової пили полягає в тому, що при повороті на кутовий крок бічні ріжучі кромки зубів обкочувальної фрези формують передню поверхню зубів на заготовці.

Які ріжучу кромку фасонної обкочувальної фрези при похилому встановленні її осі, приймемо характеристику, визначену при вибраному положенні оброблюваної канавки.

Суть корисної моделі, що заявляється, пояснюється кресленням.

На фігурі зображена система координат XYZ, зв'язана з оброблюваною деталлю. Направимо вісь Z по осі деталі, вісь Y - по найкоротшій відстані між осями деталі та фрези. Осі X і Y розташовуються в площині, перпендикулярній осі деталі. З проекрованою обкочувальною фрезою пов'яжемо систему координат $X_i Y_i Z_i$. Вісь Y_i збігається з віссю Y, вісь X_i йде по осі інструменту, - осі обертання інструменту з кутовою швидкістю - ω_0 .

Формули перетворення координат у цьому випадку записуються таким чином:

$$X_C = X \cdot \cos(\tau) - Z \cdot \sin(\tau)$$

$$Y_C = Y - a_{01}$$

$$Z_C = Z \cdot \cos(\tau) + X \cdot \sin(\tau),$$

де τ - кут установки осі фрези. Кут " τ " установки осі фрези доцільно розраховувати за формулою:

$$\operatorname{tg}(\tau) = \frac{D \cdot Z_{\phi}}{D_{\phi} \cdot Z},$$

де D - діаметр точки B профілю деталі;

D - діаметр фрези, за допомогою якої ведеться обробка;

45 Z_{ϕ} - число зубів дискової фрези;

Z - число зубів оброблюваної фрези.

З нерівномірним кроком зубів змінюються координати точок C і B відповідних профілів.

Послідовність розрахунку може бути наступна:

В системі XYZ визначаються координати двох точок A і B профілю.

50 $X_A = 0,5 \cdot D \cdot \sin(\varphi + \gamma)$

$$Y_A = 0,5 \cdot D \cdot \cos(\varphi + \gamma)$$

$$X_B = X_A - H_i \cdot \sin(\varphi)$$

$$Y_B = Y_A - H_i \cdot \cos(\varphi),$$

де D - діаметр оброблюваної деталі;

UA 104229 U

H_i - висота оброблюваної канавки, виміряної по передній площині. По рівнянню контакту розраховується координата Z точок характеристики:

$$Z_A = \frac{\omega_1}{\omega_0} \cdot \frac{(X_A + Y_A \cdot \operatorname{ctg}(\varphi))}{\cos(\varphi)} - \operatorname{tg}(\tau) \cdot \operatorname{ctg}(\varphi) \cdot (Y_A - a_{01}) - X_A \cdot \operatorname{tg}(\tau)$$

$$Z_B = \frac{\omega_1}{\omega_0} \cdot \frac{(X_B + Y_B \cdot \operatorname{ctg}(\varphi))}{\cos(\varphi)} - \operatorname{tg}(\tau) \cdot \operatorname{ctg}(\varphi) \cdot (Y_B - a_{01}) - X_B \cdot \operatorname{tg}(\tau)$$

- 5 Таким чином координати двох точок прямолінійної характеристики на передній поверхні в системі XYZ будуть: $A(X_A Y_A Z_A)$, $B(X_B Y_B Z_B)$. Координати точки характеристики, відповідної точці C профілю деталі в системі XYZ розраховуються в такій послідовності:

Координати XY точки C будуть:

$$X_C = 0,5 \cdot D \cdot \sin(\varphi + \gamma - \varepsilon_i)$$

$$10 \quad Y_C = 0,5 \cdot D \cdot \cos(\varphi + \gamma - \varepsilon_i),$$

де ε_i - кутовий крок зуба пили в групі (розраховується за певною методикою);

Координата Z_C точки характеристики на потиличній площині деталі визначається за рівнянням контакту:

$$Z_C = \frac{\omega_1}{\omega_0} \cdot \frac{(X_C + Y_C \cdot \operatorname{ctg}(\theta - \varphi))}{\cos(\tau)} - \operatorname{tg}(\tau) \cdot \operatorname{ctg}(\theta - \varphi) \cdot (Y_C - a_{01}) - X_C \cdot \operatorname{tg}(\tau)$$

- 15 Знаючи координати точок характеристик в системі XYZ за формулами перетворення координат розраховуються координати точок характеристик в системі $X_i Y_i Z_i$.

$$X_i = X \cdot \cos(\tau) - Z \cdot \sin(\tau)$$

$$Y_i = Y - a_{01}$$

$$Z_i = Z \cdot \cos(\tau) + X \cdot \sin(\tau)$$

- 20 Дві точки $A(X_i Y_i Z_i)$ і $B(X_i Y_i Z_i)$ визначають прямолінійну характеристику, яка приймається за ріжучу кромку фрези, яка обробляє передню площину деталі.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- 25 Спосіб нарізування обкочувальною фрезою зубів дискової пили, який **відрізняється** тим, що обробку обкочувальною фрезою зубів дискової пили здійснюють при повороті на кутовий крок бічних ріжучих кромок зубів обкочувальної фрези, які формують передню поверхню зубів на заготовці, при цьому осі фрези та пили схрещують під певним кутом і кожен зуб інструменту обробляє западину зуба на заготовці, яка відповідає своєму кроку в групі.



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **106173** (13) **U**
(51) МПК (2016.01)
B23F 5/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2015 07365	(72) Винахідник(и): Равська Наталія Сергіївна (UA), Парненко Валерія Сергіївна (UA), Родін Родіон Петрович (UA)
(22) Дата подання заявки: 22.07.2015	(73) Власник(и): НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ "КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ", пр. Перемоги, 37, м. Київ-56, 03056 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.04.2016	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.04.2016, Бюл.№ 8	
(62) Номер та дата подання попередньої заявки, з якої виділено заявку, позначену кодом (21): u201502233, 13.03.2015	

(54) ОБКОЧУВАЛЬНА ФРЕЗА ДЛЯ НАРІЗУВАННЯ ДИСКОВИХ ПИЛ З НЕРІВНОМІРНИМ КРОКОМ ЗУБІВ

(57) Реферат:

Обкочувальна фреза для попереднього нарізування дискових пил з нерівномірним кроком зубів, що містить зуби з прямолінійними ріжучими кромками, причому фреза виконана з нерівномірним кроком зубів, при цьому кожен зуб має різний радіус вершини і число входів кратно числу зубів у групі.

UA 106173 U

UA 106173 U

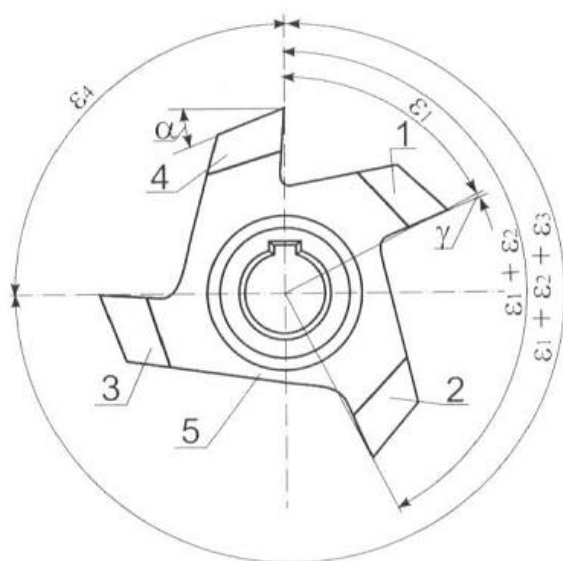


Fig. 1

UA 106173 U

Корисна модель належить до металообробки, а конкретно, до інструментального виробництва, і призначена для попередньої обробки дискових пил з нерівномірним кроком зубів.

Відомий патент України № 14837 МПК В23С 5/02 В23D 61/00 "Обкочувальна дискова фреза для обробки багатограних валів" опубл. 15.05.2006 р. Обкочувальну дискову фрезу для обробки багатограних валів, згідно з корисною моделлю, проектують на основі вихідної інструментальної поверхні, коли за різальну крайку приймається прямолінійна характеристика.

Недоліком цієї фрези є те, що нею неможливо обробляти дискові багатозубі деталі, які мають передні кути, а також багатозубі деталі з нерівномірним кроком зубів.

Найбільш близькою до запропонованої корисної моделі за технічною суттю та ефектом, що досягається, є конструкція обкочувальної фасонної фрези А.С. СРСР № 1373501, В 23 F 5/12 "Способ нарезания храповых колес и дисковая угловая фреза для его осуществления", опубл. 15.02.1988 р. Обкочувальна фреза містить корпус та різучі зуби з прямолінійними різучими кромками, які розташовані на корпусі з однаковим кутовим кроком. Обкочувальна фреза обробляє храпові колеса з використанням методу обкочування.

Недоліком відомої фрези є те, що нею неможливо обробляти дискові пили з нерівномірним кроком зубів, тому що зуби даного інструменту розташовані на корпусі з однаковим кутовим кроком.

В основу корисної моделі поставлена задача розробити конструкцію обкочувальної фрези для обробки багатозубого інструменту з нерівномірним кроком, що дозволить обробляти дискові пили з нерівномірним кроком.

Поставлена задача вирішується шляхом вдосконалення конструкції обкочувальної фрези за рахунок змінення кутового кроку зубів фрези, тобто кутовий крок зубів обкочувальної фрези відповідає в групі кутовому кроку зубів одержуваної дискової пили.

Новим є те, що обкочувальна фреза, що заявляється, має нерівномірний крок зубів. Така конструкція обкочувальної фрези забезпечує отримання необхідного профілю западин зубів на пилі без підрізання їх задньої поверхні кожним наступним зубом обкочувальної фрези за рахунок відповідності кутів повороту зубів обкочувальної фрези кутам повороту зубів дискової пили. Тобто повний оберт обкочувальної фрези відповідає повороту дискової пили на кут групи зубів. Взаємозв'язок кутових кроків зубів обкочувальної фрези і кутових кроків групи зубів дискової пили виглядає наступним чином за формулою:

$$\varepsilon_i^{\phi} = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_i}{\varepsilon_{\min} \sum \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{\min}}},$$

де: ε_i^{ϕ} - кутовий крок зубів обкочувальної фрези;

ε_i - кутовий крок зуба пили в групі (розраховується за певною методикою);

ε_{\min} - мінімальний кутовий крок групи зубів дискової пили.

Суть корисної моделі, що заявляється, пояснюється кресленнями на Фіг. 1-4.

На фігурі 1 зображена обкочувальна фреза з нерівномірним кроком зубів. Обкочувальна фреза містить зуби 1,2,3,4 розташовані на корпусі 5, які мають різний радіус вершини R_i і зсув зубів B_i уздовж осі інструмента щодо зуба з найбільшим радіусом (Фіг. 2). Кут профілю вибраний симетричний, але можливий вибір і фасонного несиметричного профілю. При цьому, згідно з розподілом нерівномірності кроку, зуб 1 має найменший радіус R_1 і найбільший зсув B_1 , зуб 3 має найбільший радіус R_3 і нульовий зсув B_3 , зуби 2 і 4 мають однакові радіуси $R_{2,4}$ і зміщення $B_{2,4}$ (Фіг. 3).

Координати точок профілю (Фіг. 4) наступні:

- координати точки А

$$Xa_i = 0,5 \cdot D \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2} + \gamma - \varepsilon_i\right); Ya_i = 0,5 \cdot D \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2} + \gamma - \varepsilon_i\right);$$

- координати точки В

$$Xb_i = A_i + \frac{h_i \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\cos(\gamma)}; Yb_i = \sqrt{(Rv_i)^2 + (A_i)^2} + \frac{h_i \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\cos(\gamma)};$$

- координати точки М

$$Xm_i = A_i; Ym_i = \sqrt{(0,5 \cdot D)^2 - (A_i)^2};$$

UA 106173 U

де: θ - кут профілю фрези;

γ - передній кут зубів пили;

D - діаметр пили;

h_i - висота зуба (розраховується за певною методикою);

5 R_{γ_i} - радіус западини зубів пили (розраховується за певною методикою);

A_i - параметр установки або зсув вершини зуба фрези відносно осі пили уздовж осі фрези (розраховується за певною методикою). Різниця по радіусах вершин визначається з різниці координат Y точок M для різних зубів обточувальної фрези. Зсув вершин зубів визначається з різниці координат X вершин (точок M) для різних зубів обточувальної фрези.

10

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Обточувальна фреза для попереднього нарізування дискових пил з нерівномірним кроком зубів, що містить зуби з прямолінійними ріжучими кромками, яка **відрізняється** тим, що фреза виконана з нерівномірним кроком зубів, при цьому кожен зуб має різний радіус вершин і число входів кратне числу зубів у групі.

15

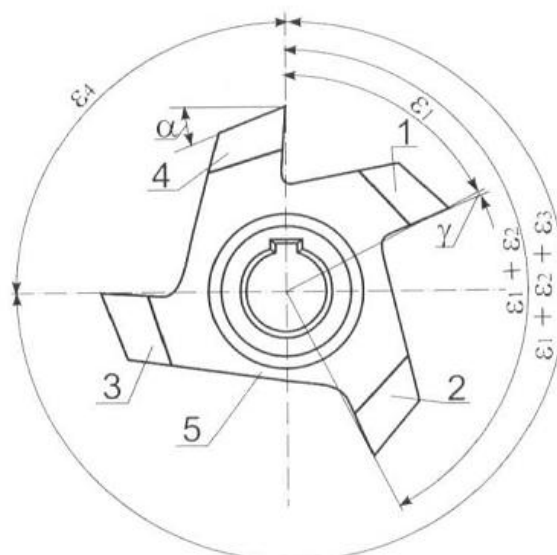


Fig. 1

UA 106173 U

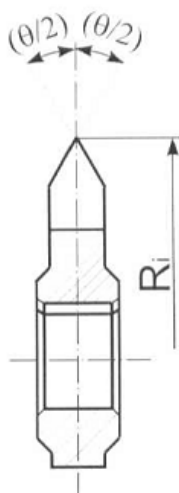


Fig. 2

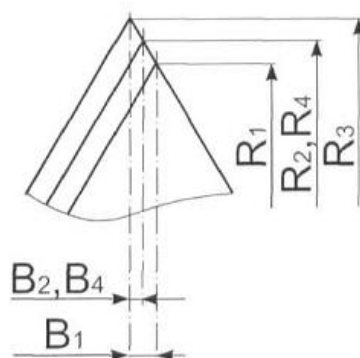
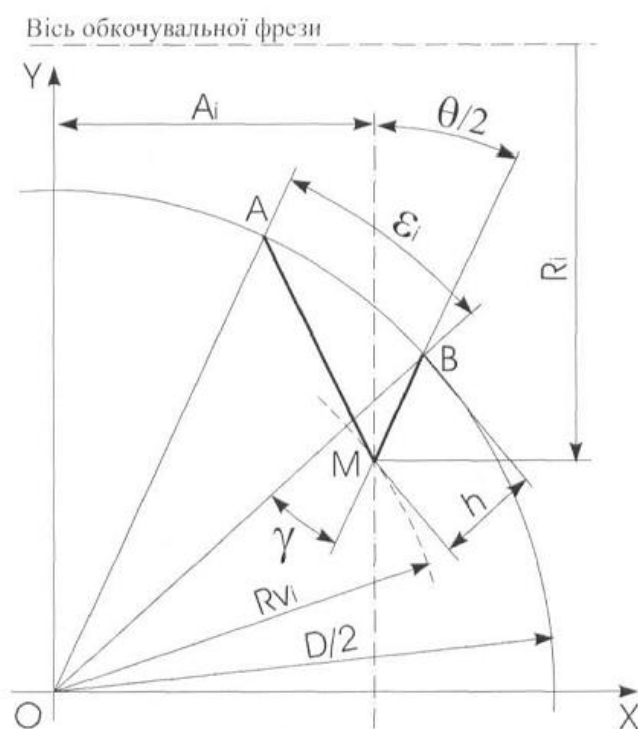


Fig. 3

UA 106173 U



Фиг. 4

Комп'ютерна верстка О. Рябко

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

ДОДАТОК В

Документація про практичне використання та впровадження основних
результатів роботи



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

ВІННИЦЬКИЙ
ІНСТРУМЕНТАЛЬНИЙ
ЗАВОД

ул. Ватутина, 25, г. Винница, Украина, 21011.

E-mail: viz_vb@ukr.net

Тел./Факс (0432) 27-15-37, 27-34-73, бух. 27-69-69, ОСиМ 27-47-35, 27-07-20



Директору

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ТОВ «ВІЗ»

Піддубецький П.І.

20 18 р.

Акт випробувань

результатів дисертаційної роботи

Парненко В.С.

На виробництві ТОВ «Вінницький інструментальний завод» випробувані результати дисертаційної роботи Парненко Валерії Сергіївни, представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а саме спосіб обробки відрізних пил з нерівномірним кроком способом обкатки на зубофрезерному верстаті та методика проектування дискових обкатних фрез з нерівномірним кроком.

Основні наукові рекомендації та розробки, отримані в дисертаційній роботі аспіранта Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського» Парненко В.С., полягають в тому, що був запропонований спосіб обробки відрізних пил з нерівномірним кроком способом обкатки, а так ж запропонований інструмент для реалізації цього способу - дискова обкатна фреза з нерівномірним кроком.

Виготовлені за рекомендаціями Парненко В.С. дискові обкатні фрези з нерівномірним кроком і числом зубів $Z = 4$ та $Z = 6$ показали:

- підвищення продуктивності виготовлення відрізних пил в 2 рази;
- підвищення точності обробки відрізних пил по кроку на 30% в порівнянні з обробкою шляхом копіювання.

Розглядається питання придбання методики проектування дискових обкатних фрез для їх реалізації у виробництві.

Головний інженер ТОВ «ВІЗ»

Морозов В.Б

Начальник ТО

Слободянюк Т.П.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор механіко-машинобудівного
інституту КІП ім. Ігоря Сікорського
д.т.н., проф.

М.І.Бобир

“ 14 ” 03 2018 р.

Акт використання

результатів дисертаційної роботи Парненко В.С.

Ми, що нижче підписались: завідуючий кафедри інтегрованих технологій машинобудування, д.т.н., проф. В.А. Пасічник, заступник директора ММІ з науково-методичної роботи д.т.н., доцент О.А. Охріменко, к.т.н., доцент каф. ІТМ Ю.Й. Бесарабець, склали цей акт про те, що матеріали та результати дисертаційної роботи асистента кафедри інтегрованих технологій машинобудування Парненко Валерії Сергіївни на тему «Дискові обкатні фрези для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком», поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти, використовується у навчальному процесі КІП ім. Ігоря Сікорського при підготовці фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня магістр за спеціальністю «131 - прикладна механіка» та спеціалізацією «Інструментальні системи та технології формоутворення деталей» і використовуються при викладанні дисциплін «Теорія проектування інструменту» та «Автоматизоване проектування різального інструменту», а також в курсовому і дипломному проектуванні.

Завідуючий кафедри інтегрованих
технологій машинобудування, д.т.н., проф.

В.А. Пасічник

Заступник директора ММІ з науково-
методичної роботи, д.т.н., доц.

О.А. Охріменко

к.т.н., доцент кафедри інтегрованих
технологій машинобудування

Ю.Й. Бесарабець

Директор ТОВ «Костянтинівський
завод механічного обладнання»

«18» 04 2018р. Е.В. Тригоренко

«18» 04 2018р.

Директор ММІ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
д.т.н., проф.

М.І.Бобир

«18» 04 2018р.

ТЕХНІЧНИЙ АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

«18» 04 2018р.

Ми, що нижче підписались, представники ТОВ «Костянтинівський завод механічного обладнання» головний інженер Кирєєв Є. М., начальник цеху Шаповалов Ю.М. і представники КПІ ім. Ігоря Сікорського, науковий керівник дисертаційної роботи «Дискові обкатні фрези для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком», д.т.н, проф. Равська Н.С. та автор роботи, асистент кафедри інтегрованих технологій машинобудування Парненко В.С.

Склали цей акт в тому, що на підприємстві ТОВ «Костянтинівський завод механічного обладнання» з використанням системи автоматизованого проектування дискових обкатних фрез в програмі SolidWorks побудована 3D модель обкатної фрези та створено креслення фрези $D_\phi=90$ мм з числом зубів в групі $Z_{gr}=4$ та $\Delta=30\%$.

Нарізання пили здійснювалось на зубофрезерному верстаті за попередньо наданою методикою.

За результатами випробувань точність по кроку не перевищувала $\pm 5'$, радіуси западин стружкових канавок лежать в межах 0.35 ± 0.04 мм, що відповідає допустимому значенню за стандартом.

Алгоритм та програма для побудови 3D моделі обкатної фрези передані на виробництво. Очікуваний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи на ТОВ "Костянтинівський завод механічного обладнання" складає 148940,00 грн в рік.

Від ТОВ "КЗМО"
Головний інженер

Є. М. Кирєєв

Начальник цеху

Ю.М.Шаповалов

«18» 04 2018р.

Від КПІ ім. Ігоря Сікорського
Науковий керівник роботи від
КПІ ім. Ігоря Сікорського

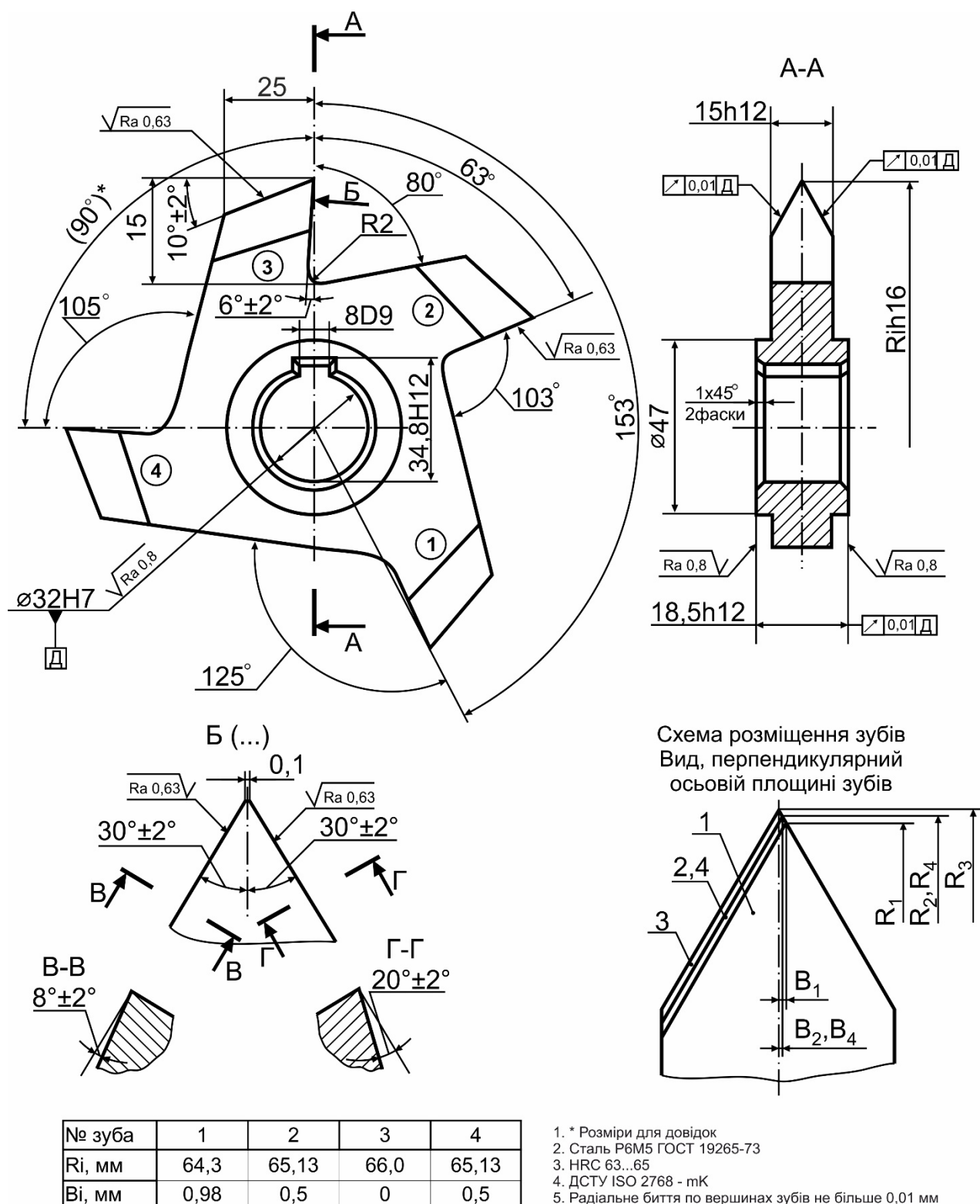
Н.С. Равська

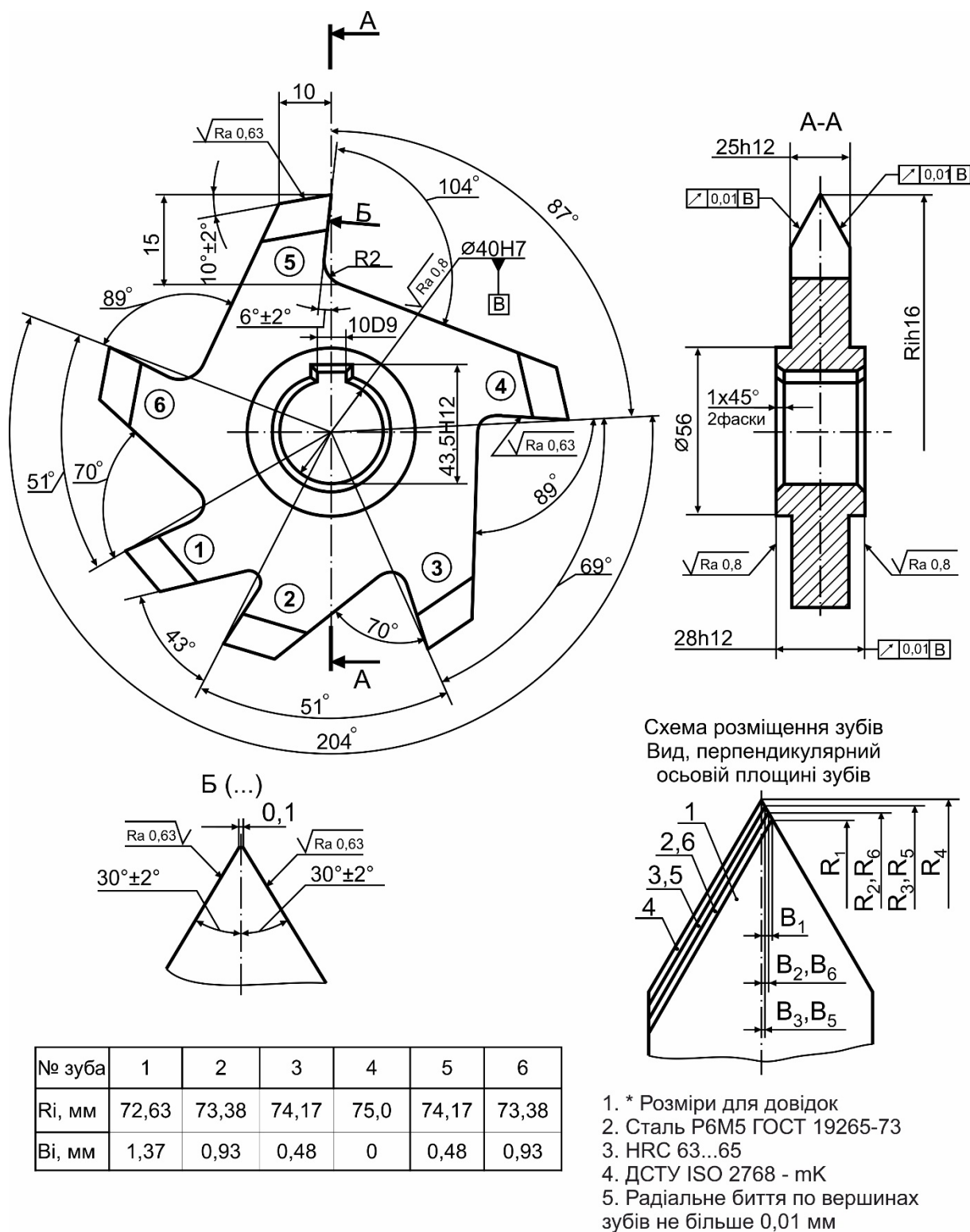
Здобувач

Парненко В.С

«18» 04 2018р.

ДОДАТОК Г

Рисунок Г.1 – Обкатна фреза $Z_0=4$

Рисунок Г.2 – Обкатна фреза $Z_0=6$

ДОДАТОК Д

Алгоритми та програми

Таблиця Д.1 - Параметри тривимірної параметричної моделі дискової обкатної фрези з нерівномірним кроком $Z_0=4$

Параметри	Позначення	Ідентифікатор	Повна назва у SolidWorks
Вхідні параметри пили рекомендовані або за нормативними документами			
Число зубів у групі	Zgr	zgr	-
Діаметр відрізної пили, мм	D	d	-
Число зубів пили	Z	z	-
Кут профілю пили, град	θ	teta	-
Передній кут, град	γ	gamma	-
Нерівномірність зубів у групі, %	Δ	delta	-
Половина кута профілю, град	ψ	psi	-
Вхідні параметри пили розрахункові			
Число груп нерівномірних зубів	n	n	-
Нерівномірність зубів у групі, град	Δ_{gr}	delta_gr	-
Кут, що охоплюється однією групою зубів, град	Ω	omega	-
Мінімальний кутовий крок, град	ε_0	epsilon_0	-
Кутові кроки зубів у групі, град	ε_i	epsilon_1 epsilon_2 epsilon_3 epsilon_4	-
Міжосьова відстань, мм	a	a	-
Висота зуба пили по передній поверхні, мм	H _i	h1 h2 h3 h4	-
Координата X точки A профілю пили, мм	X _A	xa	-
Координата Y точки A профілю пили, мм	Y _A	ya	-
Координата X _i точки B профілю пили, мм	X _{B1} X _{B2} X _{B3}	xb1 xb2 xb3	-
Координата Y _i точки B профілю пили, мм	Y _{B1} Y _{B2} Y _{B3}	yb1 yb2 yb3	-
Координата X _i точки C профілю пили, мм	X _{C1} X _{C2} X _{C3}	xc1 xc2 xc3	-
Координата Y _i точки C профілю пили, мм	Y _{C1} Y _{C2} Y _{C3}	yc1 yc2 yc3	-
Кут нахилу осі фрези до осі пили, град	β	beta	-
Координата Z точки A профілю пили, мм	Z _A	za	-

Параметри	Позначення	Ідентифікатор	Повна назва у SolidWorks
Координата Zi точки В профілю пили, мм	Z _{B1} Z _{B2} Z _{B3}	zb1 zb2 zb3	-
Координата Zi точки С профілю пили, мм	Z _{C1} Z _{C2} Z _{C3}	zc1 zc2 zc3	-
Параметри фрези розрахункові			
Координата X точки А профілю фрези, мм	X _{AF}	xaf	-
Координата Y точки А профілю фрези, мм	Y _{AF}	yaf	-
Координата Z точки А профілю фрези, мм	Z _{AF}	zaf	-
Координата X точки Ві профілю фрези, мм	X _{BF1} X _{BF2} X _{BF3}	xbf1 xbf2 xbf3	-
Координата Y точки Ві профілю фрези, мм	Y _{BF1} Y _{BF2} Y _{BF3}	ybf1 ybf2 ybf3	-
Координата Z точки Ві профілю фрези, мм	Z _{BF1} Z _{BF2} Z _{BF3}	zbf1 zbf2 zbf3	-
Координата X точки Сі профілю фрези, мм	X _{CF1} X _{CF2} X _{CF3}	xcf1 xcf2 xcf3	-
Координата Y точки Сі профілю фрези, мм	Y _{CF1} Y _{CF2} Y _{CF3}	ycf1 ycf2 ycf3	-
Координата Z точки Сі профілю фрези, мм	Z _{CF1} Z _{CF2} Z _{CF3}	zcf1 zcf2 zcf3	-
Мінімально розрахунковий діаметр фрези, мм	D _{0min}	d0min	-
Діаметр фрези, мм	D _f	df	D1@тело заготовки
Розрахунковий діаметр фрези, мм	D0 _f	d0f	-
Параметри фрези розрахункові або рекомендовані, які залежать від D_f			
Товщина фрези, мм	B	b	D1@Бобышка-Вытянуть1
Діаметр ступиці, мм	D _{st}	dst	D1@ступица
Висота зуба, мм	H _z	hz	D21@тело фрезы
Ширина зуба, мм	B _z	bz	D1@тело фрезы
Передній кут, град	γ _v	gamma_v	D10@тело фрезы
Задній кут, град	α _v	alfa_v	D13@тело фрезы
Радіус заокруглення дна зуба, мм	R	r	D26@тело фрезы
Діаметр отвору під оправку, мм	d	dopr	D1@отв под оправку

Параметри	Позначення	Ідентифікатор	Повна назва у SolidWorks
Ширина шпонкового пазу, мм	b	bpaz	D2@шпоночный паз
Висота шпонкового пазу, мм	h	hpaz	D1@шпоночный паз
Кут профілю зуба 3, град	θf	teta_f	D1@зуб 3
Крок між 3 і 2 зубом фрези, град	$\epsilon 32$	epsilon23	D11@тело фрезы
Крок між 2 і 1 зубом фрези, град	$\epsilon 21$	epsilon21	D12@тело фрезы
Крок між 1 і 4 зубом фрези, град	$\epsilon 14$	epsilon14	D17@тело фрезы
Крок між 4 і 3 зубом фрези, град	$\epsilon 43$	epsilon43	D17@тело фрезы
Зміщення вершини зуба 3, мм	$\Delta B3$	delta_b3	D2@зуб 3
Зміщення вершини зуба 2, мм	$\Delta B2$	delta_b2	
Зміщення вершини зуба 1, мм	$\Delta B1$	delta_b1	
Зміщення вершини зуба 4, мм	$\Delta B4$	delta_b4	
Зміна радіуса зуба 3, мм	$\Delta R3$	delta_r3	
Зміна радіуса зуба 2, мм	$\Delta R2$	delta_r2	
Зміна радіуса зуба 1, мм	$\Delta R1$	delta_r1	
Зміна радіуса зуба 4, мм	$\Delta R4$	delta_r4	

Д.2 - Фрагмент програми побудови твердотільної моделі обкатної фрези

```

Set swApp = Application.SldWorks
UserForm1.Show
End Sub
Dim swApp As SldWorks.SldWorks 'об'єкт прикладна програма
Dim Part As SldWorks.ModelDoc2 'об'єкт деталь
    Dim boolstatus As Boolean 'оголошення змінних параметрів моделі
    Dim d, z, teta, gamma, delta, psi, n, delta_gr, omega, epsilon_0, epsilon_1, epsilon_2, epsilon_3, epsilon_4,
a, l, h1, h2, h3, h4, xa, ya, xb1, xb2, xb3, yb1, yb2, yb3, xc1, xc2, xc3, yc1, yc2, yc3, beta, za, zb1, zb2, zb3, zc1,
zc2, zc3, xaf, yaf, zaf, xbf1, xbf2, xbf3, ybf1, ybf2, ybf3, zbf1, zbf2, zbf3, xcf1, xcf2, xcf3, ycf1, ycf2, ycf3,
zcf1, zcf2, zcf3, d0min, df, d0f, b, dst, hz, bz, gamma_v, alfa_v, r, dopr, bpaz, hpaz, epsilon32, epsilon21,
epsilon14, epsilon43, delta_b1, delta_b2, delta_b3, delta_b4, delta_r1, delta_r2, delta_r3, delta_r4 As Double
    Const pi As Double = 3.14159265358979 'константа pi
    Const zgr As Double = 4 'число зубів у групі
    Const teta_f As Double = 60 * pi / 180 'кут профілю зуба фрези

    '-----вхідні дані -----
    d = CDBl(TextBox1.Text) 'діаметр відрізної пили
    z = CDBl(TextBox2.Text) 'число зубів пили
    teta = CDBl(TextBox3.Text) 'кут профілю пили
    gamma = CDBl(TextBox4.Text) 'передній кут
    delta = CDBl(TextBox5.Text) 'нерівномірність зубів у групі
    psi = CDBl(TextBox6.Text) 'при симетричному профілі обкатної фрези: половина кута профілю пили
    gamma_v = CDBl(TextBox7.Text) 'передній кут обкатної фрези в вершинній точці
    alfa_v = CDBl(TextBox8.Text) 'задній кут в вершинній точці
    '-----вхідні дані розрахункові-----
    n = z / zgr 'число груп нерівномірних зубів
    delta_gr = (delta * 360) / (z * 100) 'нерівномірність зубів у групі
    omega = 2 * pi / z 'кут, що охоплюється однією групою зубів
    epsilon_0 = (omega - n * delta_gr) / zgr
    epsilon_1 = epsilon_0 'кутовий крок першого зуба пили
    epsilon_2 = epsilon_0 + delta_gr 'кутовий крок другого зуба пили
    epsilon_3 = epsilon_0 + 2 * delta_gr 'кутовий крок третього зуба пили
    epsilon_4 = epsilon_0 + 3 * delta_gr 'кутовий крок четвертого зуба пили
    h1 = d / 2 * ((1 - Cos(epsilon_1) + Sin(epsilon_1) / Tan(teta + gamma)) / (1 - Tan(gamma) / Tan(teta +
gamma))) / Cos(gamma)
    h2 = d / 2 * ((1 - Cos(epsilon_2) + Sin(epsilon_2) / Tan(teta + gamma)) / (1 - Tan(gamma) / Tan(teta +
gamma))) / Cos(gamma)
    h3 = d / 2 * ((1 - Cos(epsilon_3) + Sin(epsilon_3) / Tan(teta + gamma)) / (1 - Tan(gamma) / Tan(teta +
gamma))) / Cos(gamma)
    h4 = d / 2 * ((1 - Cos(epsilon_4) + Sin(epsilon_4) / Tan(teta + gamma)) / (1 - Tan(gamma) / Tan(teta +
gamma))) / Cos(gamma)
    '-----додаткові розрахунки-----
    '-----розрахунок діаметра фрези з урахуванням переточок-----
    d0min = 2 * (d / 2 * Sin(epsilon_3 / 2) + h3 * Sin(gamma)) / (Sin(psi + gamma) * (1 - Cos(epsilon_3 * z /
(2 * zgr))))
    d0f = d0min * (zgr + 0.471) / zgr
    If d0f < 50 Then df = 50 Else df = d0f
    '-----розрахунок координат точок профілю відрізної пили-----
    'координати XY точки A
    xa = d / 2 * Sin(psi + gamma)
    ya = d / 2 * Cos(psi + gamma)
    'координати XY точки B
    xb1 = d / 2 * Sin(psi + gamma) - h1 * Sin(psi)
    xb2 = d / 2 * Sin(psi + gamma) - h2 * Sin(psi)
    xb3 = d / 2 * Sin(psi + gamma) - h3 * Sin(psi)
    xb4 = d / 2 * Sin(psi + gamma) - h4 * Sin(psi)
    yb1 = d / 2 * Cos(psi + gamma) - h1 * Cos(psi)
    yb2 = d / 2 * Cos(psi + gamma) - h2 * Cos(psi)
    yb3 = d / 2 * Cos(psi + gamma) - h3 * Cos(psi)

```



```

yb4 = d / 2 * Cos(psi + gamma) - h4 * Cos(psi)
'координати XY точки C
xc1 = d / 2 * Sin(psi + gamma - epsilon_1)
xc2 = d / 2 * Sin(psi + gamma - epsilon_2)
xc3 = d / 2 * Sin(psi + gamma - epsilon_3)
xc4 = d / 2 * Sin(psi + gamma - epsilon_4)
yc1 = d / 2 * Cos(psi + gamma - epsilon_1)
yc2 = d / 2 * Cos(psi + gamma - epsilon_2)
yc3 = d / 2 * Cos(psi + gamma - epsilon_3)
yc4 = d / 2 * Cos(psi + gamma - epsilon_4)
'-----розрахунок міжосьової відстані-----
-----
a = yb3 + df / 2
'-----визначення кута нахилу осей-----
-----
beta = Atn((yb3 / (n * (yb3 - a))) / Sqr(-(yb3 / (n * (yb3 - a))) * (yb3 / (n * (yb3 - a))) + 1))
'визначення координат Z точок
za = (1 / n) * (xa + ya * (1 / Tan(psi))) / Cos(beta) - Tan(beta) * (1 / Tan(psi)) * (ya - a) - xa * Tan(beta)
zc1 = (1 / n) * (xc1 - yc1 * (1 / Tan(teta - psi))) / Cos(beta) - Tan(beta) * (1 / Tan(teta - psi)) * (yc1 - a) -
xc1 * Tan(beta)
zc2 = (1 / n) * (xc2 - yc2 * (1 / Tan(teta - psi))) / Cos(beta) - Tan(beta) * (1 / Tan(teta - psi)) * (yc2 - a) -
xc2 * Tan(beta)
zc3 = (1 / n) * (xc3 - yc3 * (1 / Tan(teta - psi))) / Cos(beta) - Tan(beta) * (1 / Tan(teta - psi)) * (yc3 - a) -
xc3 * Tan(beta)
zc4 = (1 / n) * (xc4 - yc4 * (1 / Tan(teta - psi))) / Cos(beta) - Tan(beta) * (1 / Tan(teta - psi)) * (yc4 - a) -
xc4 * Tan(beta)
zb1 = (1 / n) * (xb1 + yb1 * (1 / Tan(psi))) / Cos(beta) - Tan(beta) * (1 / Tan(psi)) * (yb1 - a) - xb1 *
Tan(beta)
zb2 = (1 / n) * (xb2 + yb2 * (1 / Tan(psi))) / Cos(beta) - Tan(beta) * (1 / Tan(psi)) * (yb2 - a) - xb2 *
Tan(beta)
zb3 = (1 / n) * (xb3 + yb3 * (1 / Tan(psi))) / Cos(beta) - Tan(beta) * (1 / Tan(psi)) * (yb3 - a) - xb3 *
Tan(beta)
zb4 = (1 / n) * (xb4 + yb4 * (1 / Tan(psi))) / Cos(beta) - Tan(beta) * (1 / Tan(psi)) * (yb4 - a) - xb4 *
Tan(beta)
'-----визначення координат точок профілю обкатної фрези-----
-----
xaf = xa * Cos(beta) - za * Sin(beta)
yaf = ya - a
zaf = za * Cos(beta) + xa * Sin(beta)
xbf1 = xb1 * Cos(beta) - zb1 * Sin(beta)
xbf2 = xb2 * Cos(beta) - zb2 * Sin(beta)
xbf3 = xb3 * Cos(beta) - zb3 * Sin(beta)
xbf4 = xb4 * Cos(beta) - zb4 * Sin(beta)
ybf1 = yb1 - a
ybf2 = yb2 - a
ybf3 = yb3 - a
ybf4 = yb4 - a
zbf1 = zb1 * Cos(beta) + xb1 * Sin(beta)
zbf2 = zb2 * Cos(beta) + xb2 * Sin(beta)
zbf3 = zb3 * Cos(beta) + xb3 * Sin(beta)
zbf4 = zb4 * Cos(beta) + xb4 * Sin(beta)
xcf1 = xc1 * Cos(beta) - zc1 * Sin(beta)
xcf2 = xc2 * Cos(beta) - zc2 * Sin(beta)
xcf3 = xc3 * Cos(beta) - zc3 * Sin(beta)
xcf4 = xc4 * Cos(beta) - zc4 * Sin(beta)
ycf1 = yc1 - a
ycf2 = yc2 - a
ycf3 = yc3 - a
ycf4 = yc4 - a
zcf1 = zc1 * Cos(beta) + xc1 * Sin(beta)
zcf2 = zc2 * Cos(beta) + xc2 * Sin(beta)

```



```

zcf3 = zc3 * Cos(beta) + xc3 * Sin(beta)
zcf4 = zc4 * Cos(beta) + xc4 * Sin(beta)
'розрахунок кутових кроків обкатної фрези
epsilon32 = epsilon_3 * z / zgr
epsilon21 = epsilon_2 * z / zgr
epsilon14 = epsilon_1 * z / zgr
epsilon43 = epsilon_4 * z / zgr
'розрахунок зміщення вершин зубів
delta_b1 = b / 2 - (xbf1 - xbf3)
delta_b2 = b / 2 - (xbf2 - xbf3)
delta_b3 = b / 2
delta_b4 = b / 2 - (xbf4 - xbf3)
'розрахунок радіусів кожного зуба
delta_r1 = df / 2 - (ybf1 - ybf3)
delta_r2 = df / 2 - (ybf2 - ybf3)
delta_r3 = df / 2
delta_r4 = df / 2 - (ybf4 - ybf3)
'-----вибір параметрів фрези в залежності від діаметра-----
Select Case df
  Case 50 To 54.9
    b = 5.5: dopr = 19: dst = 10: hz = 25: bz = 20: r = 5: bpaz = 10: hpaz = 5
  Case 55 To 79.9
    b = 10.5: dopr = 22: dst = 10: hz = 25: bz = 20: r = 5: bpaz = 10: hpaz = 5
  Case 80 To 109.9
    b = 20: dopr = 27: dst = 10: hz = 25: bz = 20: r = 5: bpaz = 10: hpaz = 5
  Case 110 To 139.9
    b = 31: dopr = 32: dst = 10: hz = 25: bz = 20: r = 5: bpaz = 10: hpaz = 5
  Case 140 To 179.9
    b = 47: dopr = 40: dst = 10: hz = 25: bz = 20: r = 5: bpaz = 10: hpaz = 5
  Case 180 To 200
    b = 53: dopr = 50: dst = 10: hz = 25: bz = 20: r = 5: bpaz = 10: hpaz = 5
  Case Else
End Select
'-----зміна значень параметрів моделі обкатної фрези-----
Part.Parameter("D1@тело заготовки").SystemValue = df / 1000 'діаметр найбільшого зуба фрези
Part.Parameter("D1@Бобышка-Вытянуть1").SystemValue = b / 1000 'товщина фрези
Part.Parameter("D1@ступица").SystemValue = dst / 1000 'діаметр ступиці
Part.Parameter("D21@тело фрезы").SystemValue = hz / 1000 'висота зуба
Part.Parameter("D1@тело фрезы").SystemValue = bz / 1000 'ширина зуба
Part.Parameter("D10@тело фрезы").SystemValue = gamma_v * pi / 180 'передній кут в вершинній
точці
Part.Parameter("D13@тело фрезы").SystemValue = alfa_v * pi / 180 'задній кут в вершинній точці
Part.Parameter("D26@тело фрезы").SystemValue = r / 1000 'радіус заокруглення дна зуба
Part.Parameter("D1@отв под оправку").SystemValue = dopr / 1000 'діаметр отвору під оправку
Part.Parameter("D2@шпоночный паз").SystemValue = bpaz / 1000 'ширина шпонкового пазу
Part.Parameter("D1@тело фрезы").SystemValue = hpaz / 1000 'висота шпонкового пазу
Part.Parameter("D1@зуб 3").SystemValue = teta_f 'кут профілю зубів фрези
Part.Parameter("D11@тело фрезы").SystemValue = epsilon32 * pi / 180 'крок між 3 і 2 зубом фрези
Part.Parameter("D12@тело фрезы").SystemValue = epsilon21 * pi / 180 'крок між 2 і 1 зубом фрези
Part.Parameter("D17@тело фрезы").SystemValue = epsilon14 * pi / 180 'крок між 1 і 4 зубом фрези
Part.Parameter("").SystemValue = epsilon43 * pi / 180 'крок між 4 і 3 зубом фрези
Part.Parameter("D2@зуб 3").SystemValue = delta_b3 / 1000 'зміщення 3 зуба фрези
Part.Parameter("D2@зуб 3").SystemValue = delta_b2 / 1000 'зміщення 2 зуба фрези
Part.Parameter("D2@зуб 3").SystemValue = delta_b1 / 1000 'зміщення 1 зуба фрези
Part.Parameter("D2@зуб 3").SystemValue = delta_b4 / 1000 'зміщення 4 зуба фрези
Part.Parameter("D2@зуб 3").SystemValue = delta_r3 / 1000 'зміна радіуса 3 зуба фрези
Part.Parameter("D2@зуб 3").SystemValue = delta_r2 / 1000 'зміна радіуса 2 зуба фрези
Part.Parameter("D2@зуб 3").SystemValue = delta_r1 / 1000 'зміна радіуса 1 зуба фрези
Part.Parameter("D2@зуб 3").SystemValue = delta_r4 / 1000 'зміна радіуса 4 зуба фрези
Print to_textbox 'вивести результати в текстове поле
Part.EditRebuild 'перебудувати дискову обкатну фрезу

```

End Sub

'процедура ініціалізації форми
Private Sub UserForm_Initialize()

End Sub

'функція арккосинуса кута в радіанах
Private Function Arccos(ByVal x As Double) As Double
 Arccos = Atn(-x / Sqr(-x * x + 1)) + 2 * Atn(1)

End Function

'підпрограма обробки події Click для CommandButton2

Private Sub CommandButton2_Click()

 UserForm1.Hide 'Сховати форму

End Sub

'процедура виводу результатів розрахунку в текстове поле

Private Sub Print_to_textbox()

 TextBox9.MultiLine = True

 TextBox9.ScrollBars = fmScrollBarsBoth

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "n=" & CStr(n) & Chr(13)

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "delta_gr=" & CStr(delta_gr * 180 / pi) & Chr(13)

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "epsilon_1=" & CStr(epsilon_1 * 180 / pi) & Chr(13)

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "epsilon_2=" & CStr(epsilon_2 * 180 / pi) & Chr(13)

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "epsilon_3=" & CStr(epsilon_3 * 180 / pi) & Chr(13)

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "epsilon_4=" & CStr(epsilon_4 * 180 / pi) & Chr(13)

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "a=" & CStr(a) & Chr(13)

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "beta=" & CStr(beta * 180 / pi) & Chr(13)

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "d0min=" & CStr(d0min) & Chr(13)

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "df" & CStr(df) & Chr(13)

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "b=" & CStr(b) & Chr(13)

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "epsilon32=" & CStr(epsilon32 * 180 / pi) & Chr(13)

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "epsilon21=" & CStr(epsilon21 * 180 / pi) & Chr(13)

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "epsilon14=" & CStr(epsilon14 * 180 / pi) & Chr(13)

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "epsilon43=" & CStr(epsilon43 * 180 / pi) & Chr(13)

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "delta_b1=" & CStr(delta_b1) & Chr(13)

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "delta_b2=" & CStr(delta_b2) & Chr(13)

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "delta_b3=" & CStr(delta_b3) & Chr(13)

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "delta_b4=" & CStr(delta_b4) & Chr(13)

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "delta_r1=" & CStr(delta_r1) & Chr(13)

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "delta_r2=" & CStr(delta_r2) & Chr(13)

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "delta_r3=" & CStr(delta_r3) & Chr(13)

 TextBox9.Value = TextBox9.Value & "delta_r4=" & CStr(delta_r4) & Chr(13)

End Sub

Sub freza4zub()

End Sub

ДОДАТОК Е

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про
апробацію результатів дисертації

1. Равская Н.С., Бабенко А.Е., Боронко О.А., Парненко В.С. Проектирование прогрессивных конструкций дисковых пил с неравномерным шагом зубьев. Донецкий государственный технический университет. Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Донецк, 2000. №13. С. 134-137.
2. Спосіб нарізування дискових пил з нерівномірним кроком зубів: пат. у 2015 02233 Україна: МПК (2016.01), В23F 5/00. № 104229; заявл. 13.03.2015; опубл. 25.01.2016, Бюл. № 2. 4 с.
3. Обкочувальна фреза для нарізування дискових пил з нерівномірним кроком зубів: пат. у 2015 07365 Україна: МПК (2016.01), В23F 5/00. №106173; заявл. 22.07.2015; опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8. 4 с.
4. Парненко В.С. Расчет параметров впадин обкаточных дисковых фрез для изготовления пил с неравномерным шагом. Вестник Национального Технического Университета Украины "КПИ", серия Машиностроение. Киев, 2014. №72. С.152-155.
5. Парненко В.С., Равська Н.С., Охрименко О.А. Особливості виготовлення відрізних дискових фрез на зубофрезерному верстаті. XIV Міжнародна науково-технічна конференція: Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. (м. Краматорськ, 30 трав. - 1 черв. 2016 р.). Краматорськ. 2016. С.70-71.
6. Равська Н.С., Парненко В.С. Особливості заточки фасонних дискових обкатних фрез для обробки багатозубих виробів з нерівномірним кроком по задній поверхні. XV Міжнародна науково-технічна конференція: Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. (м. Краматорськ, 30 трав. – 1 черв. 2017 р.). Краматорськ. 2017. С.72-73.

7. *Парненко В.С., Равська Н.С.* Визначення кінематичного переднього кута зуба дискової обкатної фрези для обробки багатозубих виробів з нерівномірним кроком. XVII Міжнародна науково-технічна конференція: Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта. (м. Одеса, 21 черв. 2016р.). Одеса. 2016. С.249-250.
8. *Парненко В.С.* Классификация изделий машиностроения прямолинейного профиля зубьев. «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». Міжнародний збірник наукових праць Донецького Національного Технічного Університету. Донецьк, 2014. №2 (48). С.29-37
9. *Равська Н.С., Парненко В.С.* Дослідження геометрії задньої поверхні різальної частини дискових обкатних фрез з нерівномірним кроком. Науковий журнал «Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки». Київ, 2018. Том 29 (68). № 2. С.21-31.
10. *Равська Н.С., Парненко В.С.* Визначення статичних передніх і задніх кутів фасонної обкатної фрези у вершинної точки її ріжучої кромки. Збірник наукових праць. «Перспективні технології та прилади». Луцьк, 2016. №8. С.95-97.
11. *Бабенко А.Е., Боронко О.А., Лорох Р., Парненко В.С.* Влияние наклона зубьев фрезы на ее динамические характеристики. II Міжнародна конференція: Прогресивна техніка і технологія – 2001. (м. Севастополь, 28 черв. - 2 лип. 2001). Київ – Севастополь. 2001. С.77.
12. *Парненко В.С.* Определение формы режущей кромки обкаточной фрезы при взаимоперпендикулярных осях заготовки и инструмента. Сборник трудов XIX международной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике». (г. Новосибирск, 20 марта 2013). Новосибирск, 2013. С.39-46.

13. *Парненко В.С.* Анализ способов обработки дисковых многозубых инструментов. Сборник трудов XXXII международной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике». (г. Новосибирск, 19 марта 2014). Новосибирск, 2014. №3 (28). С.28-34.
14. *Парненко В.С.* Методика розрахунку кута повороту інструменту другого порядку для отримання визначеного нахилу зубів оброблюваного інструмента. Загально-університетська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів, присвяченої дню Науки. Матеріали конференції. (м. Київ, 24 лют. 2014). Київ. 2014. С. 64-66.
15. *Парненко В.С.* Определение профиля зуба дисковой пилы, обрабатываемого дисковой обкаточной фрезой. Збірник наукових праць за матеріалами міжнародної науково-практичної конференції: Інноваційні підходи і сучасна наука. (м. Київ, 24 лют. 2015). Київ. 2015. С.46-48.
16. *Парненко В.С.* Методика расчета угла поворота инструмента для получения определенного наклона зубьев обрабатываемых инструментов. Збірник наукових праць за матеріалами міжнародної конференції: Наука в епоху дисбалансів. (м. Київ, 24 лют. 2016). Київ. 2016. С.95-97.
17. *Вовк В. В., Парненко В.С.* Дослідження кінематичних геометричних параметрів передньої поверхні дискової обкатної фрези. Збірник наукових праць за матеріалами III міжнародної конференції: Наука і сучасність: виклики глобалізації. (Київ, 31 трав. 2017 р.). Київ. 2017. С.73-80.
18. *Бабенко А.Є., Равська Н.С., Боронко О.О., Парненко В.С.* Про вплив на коливання фрези кута нахилу зубців. Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. Житомир, 2000. №12. С.49-54.

19. Бабенко А.Є., Боронко О.О., Парненко В.С. Вимушені коливання дискової фрези. Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. Житомир, 2001. №18. С. 28-32.